

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
Departamento de Engenharia de Produção**

**ADÃO FRANCISCO DE ALMEIDA JÚNIOR**

**Reaproveitamento de pneus inservíveis: determinação em  
laboratório das características do asfalto modificado SBS  
comparadas às do asfalto com pó de borracha**

**Bauru  
2012**

**ADÃO FRANCISCO DE ALMEIDA JÚNIOR**

**Reaproveitamento de pneus inservíveis: determinação em  
laboratório das características do asfalto modificado SBS  
comparadas às do asfalto com pó de borracha**

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Engenharia da Universidade Estadual  
Paulista “Júlio de Mesquita Filho” para  
obtenção do título de Mestre em Engenharia  
de Produção

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rosane Aparecida Gomes Battistelle**

**Bauru  
2012**

## Ficha Catalográfica

Almeida Júnior, Adão Francisco de.  
Reaproveitamento de pneus inservíveis:  
determinação em laboratório das características do  
asfalto modificado SBS comparadas às do asfalto com  
pó de borracha / Adão Francisco de Almeida Júnior,  
2012.

97 f.

Orientador: Rosane Aparecida Gomes Battistelle

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual  
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012

1. Asfaltos modificados. 2. Pneus usados. 3. Pó de  
borracha. 4. Meio ambiente. I. Universidade Estadual  
Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.



**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ADÃO FRANCISCO DE ALMEIDA JUNIOR, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.**

Aos 18 dias do mês de janeiro do ano de 2012, às 09:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA SEÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Profa. Dra. ROSANE APARECIDA GOMES BATTISTELLE do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ANDERSON MANZOLI do(a) Centro Universitário / Universidade do Sistema Educacional Brasileiro - COC, Profa. Dra. BARBARA STOLTE BEZERRA do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ADÃO FRANCISCO DE ALMEIDA JUNIOR, intitulado "REAPROVEITAMENTO DE PNEUS INSERVÍVEIS: DETERMINAÇÃO EM LABORATÓRIOS DAS CARACTERÍSTICAS DO ASFALTO MODIFICADO SBS COMPARADAS ÀS DO ASFALTO COM PÓ DE BORRACHA". Após a exposição, o discente foi argüido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

  
Profa. Dra. ROSANE APARECIDA GOMES BATTISTELLE

  
Prof. Dr. ANDERSON MANZOLI

  
Profa. Dra. BARBARA STOLTE BEZERRA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, que está acima de tudo.

A minha esposa Patrícia e aos meus filhos Lucas e Felipe, por estarem sempre ao meu lado, pela compreensão carinho e incentivo.

E obrigado a todos aqueles que contribuíram para a realização desse trabalho especialmente a professora e amiga Rosane pelo apoio, dedicação, colaboração e compreensão.

## RESUMO

Diante do crescimento populacional considerável e conseqüentemente uma maior demanda por produtos industrializados, com ciclos de vida cada vez menores, é de fundamental importância buscar alternativas que minimizem as agressões e as degradações ao meio ambiente. Neste contexto, é importante apontar os pneus inservíveis, pois se abandonados ou dispostos inadequadamente, além de se tornarem um passivo ambiental, causam sérios problemas ao meio ambiente, à paisagem urbana e à saúde da população. Assim este trabalho faz uma análise comparativa utilizando dados laboratoriais referentes às características do asfalto borracha (em três composições de asfalto com 15%, 18% e 20% de borracha triturada), comparando-as com as do asfalto modificado convencional, utilizado no Brasil na atualidade (asfalto modificado com polímeros SBS) que atende a especificação atual do DNIT 129/2010. As características e os comportamentos foram avaliados de acordo com os ensaios de penetração, ponto de amolecimento e fulgor, viscosidade, recuperação elástica e separação de fases. Através dos ensaios, conclui-se que os dois materiais possuem características distintas, como por exemplo, no que diz respeito à penetração e ao ponto de amolecimento, com comportamento inversamente proporcional, quanto maior o ponto de amolecimento menor a penetração, quanto à viscosidade essa conclusão também pode ser aplicada, isto é, quanto maior o teor de borracha maior a consistência, nos ensaios de separação de fases, nota-se que quanto maior o teor de borracha maior é a separação, já nos ensaios de recuperação elástica os valores foram próximo dos 50%.

**PALAVRAS CHAVE:** asfaltos modificados, pneus usados, pó de borracha, meio-ambiente.

## ABSTRACT

Given the considerable population growth and consequently a greater demand for industrial products, with life cycles ever smaller, it is very important to seek alternatives that minimize the aggression and the degradation of the environment. In this context it is important to point out the tires, it is abandoned or disposed of improperly, and become an environmental liability, cause serious problems for the environment, landscape and people's health. So this paper makes a comparative analysis using laboratory data regarding the characteristics of the asphalt rubber (three asphalt compositions with 15%, 18% and 20% crumb rubber), comparing them with those of conventional modified asphalt, used in Brazil today (SBS polymer modified asphalt) that meets the current specification of DNIT 129/2010. The characteristics and performances were evaluated according to the tests of penetration, softening point and flash, viscosity, elastic recovery and separation of phases. Through trials, it was concluded that the two materials have distinct characteristics, such as with regard to penetration and the softening point, to conduct inversely, the higher the softening point of less penetration, such as the viscosity conclusion can also be applied, ie the higher the rubber content greater consistency in testing phase separation, it is noted that higher rubber content the greater the separation already during the testing of elastic recovery values were around 50%.

Keywords: modified asphalt, used tires, rubber dust, and environment.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma das ações para realização da fase metodológica.....	17
Figura 2 – Foto com vista geral do aterro sanitário de São Paulo, Brasil.....	20
Figura 3 – Foto do aterro sanitário de São Paulo, Brasil.....	20
Figura 4 – Depósito de pneus inservíveis. ....	22
Figura 5 – Foto pneus inservíveis. ....	23
Figura 6 – Mapa com a localização das indústrias brasileiras.....	24
Figura 7 – Composição de Pneus Radiais para Automóveis.....	26
Figura 8 – Partes de um pneu radial, com apresentação da nomenclatura usada....	27
Figura 9 – Apresentação das partes que compõem o pneu.....	27
Figura 10 – Matérias primas empregadas na fabricação dos pneus automotivos....	29
Figura 11 – Destinos possíveis para pneus usados e inservíveis. ....	30
Figura 12 – Exemplo de uma obra drenagem com pneus inservíveis.....	40
Figura 13 – Exemplo de uma Pista de Kart.....	41
Figura 14 – Exemplos de móveis e obras de arte. ....	42
Figura 15 – Processo resumido da obtenção de asfalto. ....	45
Figura 16 – Separação química do ligante asfáltico.....	47
Figura 17 – Estrutura de uma molécula de Asfalteno.....	48
Figura 18 – Modelo de estrutura coloidal. ....	48
Figura 19 – Exemplos de estruturas de copolímeros de estireno.....	49
Figura 20 – Processo resumido modificação asfalto borracha.....	55
Figura 21 – Grão de borracha durante o processo de fabricação. ....	56
Figura 22 – Penetrômetro (haste, agulha, controlador – temporizador).....	62
Figura 23 – Recipiente e agulha de penetração.....	62
Figura 24 – Vista Banho para condicionamento da amostra.....	63
Figura 25 – Amostra condicionada dentro do banho.....	63
Figura 26 – Conjunto em aquecimento. ....	65
Figura 27 – Momento em que a esfera toca a placa de referência. ....	65
Figura 28 – Esquema para realização ensaio. ....	66
Figura 29 – Equipamentos utilizados na realização do ensaio.....	66
Figura 30 – Equipamento automático realização ensaio de Ponto de Fulgor. ....	69
Figura 31 – Cuba para realização ensaio de Ponto de Fulgor. ....	69
Figura 32 – Viscosímetro Brookfield modelo RV.....	71

Figura 33 – Modelo de Haste e Spindle. ....	72
Figura 34 – Recipiente termostático (câmara de amostra).....	72
Figura 35 – Demonstração Molde de latão. ....	75
Figura 36 – Dimensões do molde.....	75
Figura 37 – Demonstração gráfica das médias resultados penetração.....	82
Figura 38 – Demonstração gráfica das médias resultados de ponto amolecimento .	82
Figura 39 – Demonstração gráfica das médias resultados Viscosidade Brookfield ..	83
Figura 40 – Demonstração gráfica das médias resultados de Separação Fases.....	84
Figura 41 – Demonstração gráfica das médias resultados Recuperação Elástica....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo de produção de pneus acumulado entre IBGE e ANIP.....	25
Tabela 2 - Volume de produção de pneus (unidades produzidas).....	26
Tabela 3 - Custo da reforma dos pneus no mercado mundial e no Brasil.....	37
Tabela 4 - Especificação brasileira de ligantes asfálticos.....	46
Tabela 5 - Características do cimento asfáltico modificado por polímero SBS.....	51
Tabela 6 - Composição das formulações.....	60
Tabela 7 - Características analisadas dos cimento asfálticos.....	79
Tabela 8 - Média dos ensaios realizados na composição 1 .....	80
Tabela 9 - Média dos ensaios realizados na composição 2.....	81
Tabela 10 - Média dos ensaios realizados na composição 3.....	81
Tabela 11 - Média dos ensaios realizados na composição 4.....	81
Tabela 12 - Custos das composições. ....	86

## LISTAS DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABR	Associação Brasileira dos Reformadores de Pneus
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
Bkf	Brookfield
BPF	Baixo Ponto de Fluidez
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
cP	Centi-poise
CP	Corpo-de-prova
CS <sub>2</sub>	Sulfeto de Carbono
DECEX	Departamento de Operações de Comércio Exterior
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 XIII

EA	Emulsão asfáltica
EM	Especificação de Materiais
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ISSA	International Sturry Surfacing Association
mL	Mililitro (1000/l)
MR	Módulo de resiliência
NBR	Norma Brasileira
pH	Potencial Hidrogeniônico
PMF	Pré-misturado a Frio
RPM	Rotações por Minuto
RECICLANIP	Reciclagem Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
RT	Resistência à Tração
SBS	Copolímero Stireno-Butadieno-Stireno
SECEX	Secretaria do Comércio Exterior
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavements
SSF	Viscosidade Saybolt-Furol
TEC	Tarifa Externa Comum
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução.....</b>	<b>12</b>
1.1 Justificativa .....	14
1.2. Objetivo geral.....	15
1.3. Objetivos específicos.....	15
1.4. Estrutura da pesquisa.....	16
2.1. A problemática dos resíduos sólidos .....	18
2.2. Histórico produção de pneus .....	22
2.3. Legislações aplicáveis aos pneus inservíveis.....	32
2.4. Resolução atual.....	34
<b>3. Utilização de Pneus inservíveis em Asfalto.....</b>	<b>44</b>
3.1. Asfalto (ligante Asfáltico, cimento asfáltico de petróleo - CAP) .....	44
3.2. Elastômeros.....	49
3.3. Borracha pneu moído .....	52
<b>4. Materiais e Métodos .....</b>	<b>58</b>
4.1. Materiais .....	58
4.2. Métodos.....	59
<b>5. Análise e discussão dos resultados.....</b>	<b>78</b>
<b>6. Considerações finais.....</b>	<b>85</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>89</b>

## 1. Introdução

Diante do atual crescimento populacional e conseqüentemente uma maior demanda por produtos industrializados, com ciclos de vida cada vez menores, e uma sociedade consumista marcada por descartes exuberantes e inadequados, enfatizam-se os problemas ambientais que começam a assolar a sociedade, portanto é de fundamental importância buscar alternativas que minimizem as agregações e a degradações ao meio ambiente.

Um dos principais problemas causadores de impactos ao meio ambiente são os chamados resíduos sólidos que segundo ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004), são aqueles que se encontram nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Dentro deste contexto é importante destacar os pneus inservíveis que quando abandonados ou dispostos inadequadamente, além de se tornarem um passivo ambiental, causam sérios problemas ao meio ambiente e a saúde da população, pois são depósitos de águas de chuvas e proliferação de doenças. Segundo AEROBOP - Associação Nacional das Empresas de Reciclagem de Pneus e Artefatos de Borrachas (2010), pneu inservível é todo pneu que não se presta ao processo de reforma que permita condição de reforma adicional.

A industrialização e o desenvolvimento dos países também promovem o aumento do número de veículos nas estradas, por uma necessidade logística ou por um poder econômico maior, gerando milhões de pneus.

Sendo o único elo entre o veículo e o solo, o pneu exerce papel fundamental no cotidiano, porém os resíduos de pneus constituem um encargo financeiro e ecológico, em muitas regiões do mundo. Segundo Shalaby et al. (2005), no Canadá e Estados Unidos, presume-se que é gerado um resíduo equivalente a um pneu por habitante/ano, de acordo com a ANIP - Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos, em todo o mundo a estimativa de pneus descartados por ano é superior a 2 bilhões de unidades. Deste volume menos de 20% são reciclados. Na Europa em 1999, estima-se que 300 milhões de pneus, que resulta em mais de 2 milhões de toneladas de pneus chegam ao fim de sua vida a cada ano. No Japão, estima-se que 102 milhões de pneus foram descartados (ANIP, 2009).

Em 2010, segundo a ANIP o Brasil produziu 67,3 milhões de pneus, em contra partida a esta informação, pode-se considerar que o Brasil também se colocou em posição avançada nessa questão de disposição final dos pneus descartados, com a introdução das diretrizes contidas na Resolução nº. 416/2009, apresentada pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, que revoga a resolução anterior de 258/1999. Essa nova resolução tem como determinação primordial colocar as empresas fabricantes de pneus e as importadoras como as responsáveis pela destinação final, dispondo sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada (MMA, 2010). Segundo Planeta Sustentável (2012), os importadores de pneus novos cumpriram 97,03% das metas, os fabricantes, 47,3% e, os importadores de usados, 12,92%.

Em relação aos descartes dos pneus, quando estes são abandonados em locais inadequados, além de servir de abrigo para procriação de mosquitos e outros vetores, representam ainda risco constante de incêndio, que contamina o ar com uma fumaça altamente tóxica e deixa um óleo no solo que se infiltra e contamina o lençol freático. Além disso, a disposição de pneus em aterros sanitários é problemática, pois esses pneus dificultam a compactação das camadas, reduzindo significativamente a vida útil dos aterros (ODA, 2002).

O Brasil é um país em franco crescimento econômico, possui seu sistema de transporte essencialmente rodoviário, isso em função de políticas públicas adotadas e não propriamente uma questão geográfica, o predomínio do transporte rodoviário sobre os transportes ferroviário e Hidroviário na maior parte dos casos é oriundo de motivações econômicas e políticas, pois às ferrovias, que no passado tiveram uma grande importância no escoamento da produção e no transporte de passageiros, estagnaram e caíram no esquecimento e jamais chegaram a criar uma rede de transporte bem estruturada. As rodovias, ao longo dos anos, constituíram uma verdadeira rede por todo o país, mas exibem condições estruturais bastante discrepantes de região para região, sendo motivo de orgulho em alguns lugares, mas exigindo urgente correção em outros.

Em função do modelo rodoviário adotado surge a necessidade tanto em manter sua malha rodoviária conservada quanto ampliá-la. O betume, conhecido popularmente como asfalto tem sido o principal ligante utilizado na construção de estradas e vias urbanas no Brasil. Com isso vem surgindo a necessidade de

pavimentos com melhor desempenho, que têm-se levado ao desenvolvimento e a utilização de asfaltos modificados, cuja mudança pode ser obtida pela incorporação de polímeros ou pela incorporação de pó de borracha, sendo este uso oriundo da borracha de pneus inservíveis aplicados no asfalto, que além de possibilitar uma destinação adequada para os pneus, também confere ao asfalto resultante, características antes não observadas no produto *in natura*.

Leite et al. (2000), no Brasil, avaliaram a resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas através de ensaios de deformação permanente, os resultados indicaram uma melhoria na resistência às deformações permanentes das misturas produzidas com betume-borracha em relação à mistura confeccionada com o betume.

A utilização do asfalto borracha evoluiu e se difundiu em todo o mundo. O Departamento de Transporte do Estado do Arizona – ADOT (Arizon Department of Transportation) estimou, que em 2005, foram reciclados (usados) e consumidos mais 8,5 milhões de pneus, utilizados na produção de massa asfáltica (RUBBER, 2005).

O presente trabalho busca descrever as características do asfalto de borracha, com base em resultados de pesquisas, por meio dos ensaios de viscosidade, ponto de amolecimento e fulgor, penetração, recuperação elástica, separação de fases, comparando-os com as características do asfalto convencional que é utilizado na atualidade e denominado de asfalto modificado com polímeros, cuja fabricação se baseia na norma do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT 129/2010 – Especificação de Materiais – EM (IPR, 2010).

## **1.1 Justificativa**

O cenário atual em relação às estradas brasileiras é preocupante, temos grandes extensões de estradas a serem pavimentadas com escassos recursos financeiros. O aproveitamento de resíduos na composição de novos materiais é uma tendência mundial que vem crescendo, além de representar uma possível redução de custos trazendo melhorias e facilidades técnicas e operacionais. Esta prática é adotada por alguns setores em países desenvolvidos com Estado Unidos e Canadá e começa a ser implantada no Brasil.

O aproveitamento de alguns resíduos sólidos evoluiu muito nos últimos tempos, mas alguns resíduos, tais como, resíduos de pneus e demais derivados da sua composição como a borracha, preocupam por estarem sendo dispostos sem controle no meio ambiente. “O descarte inadequado de pneus inservíveis é um dos principais responsáveis pelos problemas ambientais e de saúde pública”.

A utilização de pneus inservíveis vem ao encontro às crescentes preocupações com relação à disposição ambiental desses resíduos, além de contribuir para a economia de recursos naturais.

Algumas vantagens podem ser obtidas quando se incorpora a borracha de pneus inservíveis no asfalto para pavimentação. Dentre essas vantagens pode-se destacar:

- a) solução do problema ambiental dos pneus descartados (poluição);
- b) Minimização na extração de recursos naturais;
- b) seu manuseio não oferece riscos aos operadores;
- c) seu custo resume-se ao transporte (dos locais onde foram gerados ao ponto de utilização);
- d) Melhor desempenho dos pavimentos.

## **1.2. Objetivo geral**

O objetivo deste trabalho é descrever as características do asfalto borracha, utilizando dados laboratoriais, comparando-os com as do asfalto convencional que é o utilizado na atualidade denominado de asfalto modificado com polímeros. Desta forma, faz-se necessária a realização de ensaios laboratoriais, de acordo com a especificação (DNIT 129/2010), que visem conhecer o material a fim de contribuir para o desenvolvimento de novas tecnologias e sustentabilidade na construção de pavimentos asfálticos.

## **1.3. Objetivos específicos**

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- Levantamento bibliográfico das utilizações dos pneus inservíveis;

- Desenvolver uma possível alternativa para os pneus inservíveis por meio de ensaios laboratoriais;
- Elaborar composições do asfalto borracha e reproduzir a composição utilizada atualmente de asfalto modificado com polímeros;
- Analisar e descrever as características do asfalto borracha e compará-lo com o asfalto modificado com polímeros virgens (atualmente com um custo extremamente elevado no Brasil).

#### **1.4. Estrutura da pesquisa**

Essa dissertação está classificada de acordo com sua natureza como pesquisa aplicada por originar conhecimentos para transferência e aplicabilidade prática com vistas a solucionar problemas específicos; e pesquisa bibliográfica por abordar fontes impressas e eletrônicas envolvendo livros revistas, artigos nacionais e internacionais disponíveis ou não na *internet* (GIL, 1999). Em relação aos métodos e procedimentos técnicos utilizados são apoiados e abordados de forma quantitativa, pois considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações.

Além disso, tem como objetivo a pesquisa explicativa que de acordo com Gil (1999), quando é realizada nas ciências naturais, requer o uso de métodos experimentais.

Neste trabalho realizou-se uma análise comparativa entre o asfalto modificado com Styrene-Butadiene-Styrene - SBS e o asfalto modificado com borracha de pneu moído, considerando como parâmetro a especificação de asfalto modificado com SBS (especificação utilizada atualmente pelo Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transporte - DNIT antigo DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNIT 129/2010 EM). A abordagem metodológica será dividida em 4 etapas:

Para todas as amostras serão utilizadas os mesmos materiais (Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP, borracha pneu moído e óleo).

1ª Etapa: Para este comparativo será produzido, em laboratório, uma amostra com asfalto modificado com SBS (CAP 95%, Óleo 3,5% e SBS 1,5%), que atenda a especificação atual asfalto modificado com SBS;

2ª Etapa: Desenvolver em laboratório três amostras do asfalto modificado com borracha de pneu moído em diferentes formulações, variando - se o teor de CAP, óleo e borracha de pneu moído.

3ª Etapa: Realizar análises necessárias de acordo com a norma (DNIT 129/2010 EM) nas amostras desenvolvidas;

4ª Etapa: Descrever as características do asfalto de borracha, de acordo com os resultados laboratoriais, comparando-as com as do asfalto modificado com polímeros.

A metodologia utilizada neste trabalho apresenta-se de forma reduzida na Figura 1.

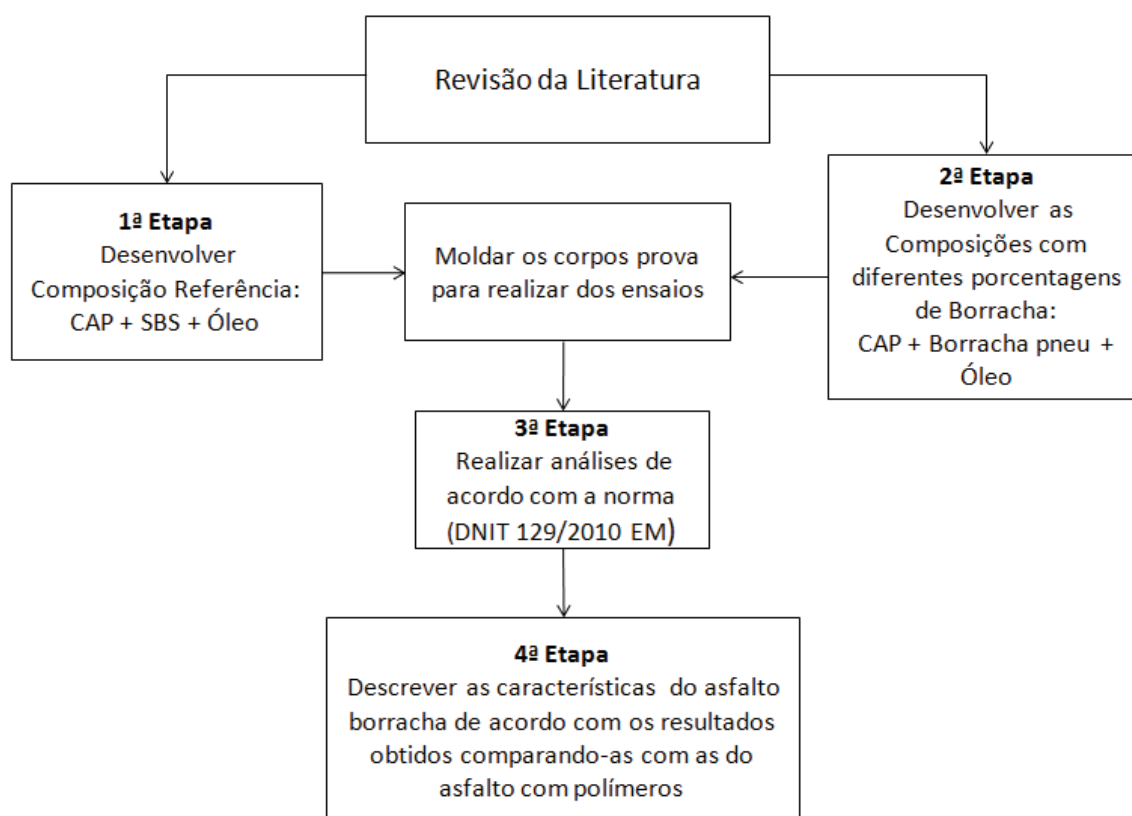


Figura 1 – Fluxograma das ações para realização da fase metodológica.

As ações mostradas na Figura 1 foram elaboradas de forma contínua de maneira a facilitar a compreensão do trabalho a ser desenvolvido. Deve-se comentar que as etapas que proporcionaram maiores dificuldades foram as etapas

2 e 4 pois trata-se das etapas de desenvolvimentos das composições e análises dos resultados.

## **2. Revisão da literatura**

Na revisão da literatura estão abordados diferentes aspectos relacionados aos pneus inservíveis, incluindo: a composição física e química, o ciclo de vida, a geração e a sua reciclagem. Estão apresentadas, ainda, as possíveis aplicações da borracha reciclada com ênfase na utilização em asfaltos para pavimentação.

### **2.1. A problemática dos resíduos sólidos**

Com o crescimento acelerado das metrópoles e com aumento do consumo de produtos industrializados e, mais recentemente, com o surgimento de produtos descartáveis, o aumento excessivo do lixo tornou-se um dos maiores problemas da sociedade moderna. Este fato é agravado pela escassez de áreas para o destino final do lixo. Os resíduos despejados no ambiente aumentaram a poluição do solo, das águas, do ar e agravou as condições de saúde da população mundial.

De acordo com a definição da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 10004:2004, resíduos sólidos são: Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2010).

Os problemas de poluição do ar, da água e o aumento de resíduos sólidos sensibilizam cada vez mais as pessoas, as empresas e até mesmo os governos para os efeitos do uso indevido de produtos que causem danos à natureza. Os custos para recuperação de áreas ambientalmente degradadas são elevados e torna-se mais barato preservar do que regenerar danos ambientais. Mesmo com a criação de medidas e procedimentos que visam reduzir o uso indiscriminado de produtos e de

ações que venham a prejudicar o meio ambiente, a dificuldade de disposição do lixo urbano continua sendo um dos mais graves problemas ambientais, principalmente no Brasil.

A Associação Brasileira de Empresas de Tratamento, Recuperação e Disposição Especiais relata que atualmente no Brasil, são gerados, cerca de 2,9 milhões de toneladas de resíduos sólidos e desses, apenas 600 mil toneladas, ou seja, 22% recebem tratamento adequado. Dos rejeitos industriais tratados, 16% vão para aterros, 1% é incinerado e os 5% restantes são co-processados, ou seja, transformam-se, por meio de queima, em parte de matéria prima para a fabricação de cimento (ABETRE, 2009).

As atividades de gerenciamentos dos resíduos sólidos, conforme Cunha e Caixeta Filho (2002), podem ser agrupadas em seis elementos funcionais: geração, acondicionamento, coleta, estação de transferência/transbordo e/ou processamento e recuperação e/ou disposição final.

Segundo Melnyk et al. (2003), que avaliaram os impactos gerados por empresas que possuem sistemas ambientais, comentam que os pontos críticos estavam relacionados à gerência e à redução de resíduos, e que, a certificação traz benefícios para a empresa (redução de resíduo no desenho e no processo de seleção de equipamento, qualidade melhorada com custos reduzidos) e ao meio ambiente que deixa de receber as agressões dos impactos industriais.

Um dos problemas evidentes no Brasil diz respeito ao manejo de resíduos sólidos urbanos, principalmente quando se trata dos impactos ambientais e da preservação dos recursos naturais.

Os resíduos sólidos, principalmente os urbanos que são enviados para aterros sanitários possui uma composição variada (plástico, borracha e vidro, por exemplo), o que dificulta ou impossibilita definir sua composição.

As Figuras 2 e 3 mostram exemplos de aterros sanitários situados na cidade de São Paulo – Brasil, com destaque para os diversos tipos de materiais.



Figura 2 – Vista geral do aterro sanitário de São Paulo, Brasil.

Fonte: Prefeitura São Paulo (2010).



Figura 3 – Aterro sanitário de São Paulo, Brasil, que destaca a variedade de materiais dispostos inadequadamente.

Fonte: Prefeitura São Paulo (2010).

Os resíduos sólidos são classificados pela Norma NBR 10004:2004 em:

- a) Resíduos classe I – Perigosos:** Resíduos sólidos ou mistura de resíduos, que em função de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, podem apresentar riscos à saúde pública, provocando ou contribuindo para um aumento de mortalidade ou incidência de

doenças ou apresentar efeitos adversos ao meio ambiente, quando manuseado ou disposto de forma inadequada.

- b) Resíduos classe II – Não Inertes:** Resíduos sólidos ou mistura de resíduos sólidos que não se enquadra na Classe I (perigosos) ou na Classe III (inertes). Estes resíduos podem ter propriedades, tais como: combustibilidade, biodegradabilidade, ou solubilidade em água.
- c) Resíduos classe III – Inertes:** Resíduos sólidos ou mistura de resíduos sólidos que, submetidos a testes de solubilização, não tenham de seus constituintes solubilizados em concentração superiores aos padrões de potabilidade de águas, executando-se os padrões: aspecto, cor, turbidez e sabor.

Como o foco dessa dissertação são os pneus inservíveis, se enquadram como Resíduos da Classe II – Inertes, (segundo o código A008).

Em agosto de 2010 foi sancionada a Lei N°12.305 sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que traz regras sobre o recolhimento das embalagens usadas, e incentiva a indústria da reciclagem, pois proíbe os "lixões" a céu aberto, assim como a importação de qualquer tipo de resíduo.

Nesta lei, o objetivo é o direcionamento de 150 mil toneladas de resíduos sólidos, que são produzidos diariamente no Brasil e, esta prevista maiores incentivos para as indústrias de reciclagem e cooperativas de catadores, ou seja:

“A adoção de uma lei nacional para disciplinar o manejo adequado dos resíduos sólidos é uma revolução em termos ambientais. Ela organiza uma série de instrumentos que estavam dispersos sem, no entanto, perder de foco a principal questão, que é a social, afirmou o presidente Lula, em discurso. Seu maior mérito é a inclusão de trabalhadores e trabalhadoras que foram esquecidos e maltratados pelo poder público. Ela está de acordo com a missão que o governo assumiu que é fazer o Brasil crescer para todos”.

A nova lei estabelece que fabricantes, importadores, distribuidores e vendedores recolham as embalagens de produtos além de determinar que a gestão

dos resíduos seja de responsabilidade de todos: governo federal, estados, municípios, empresas e sociedade (AREBOP, 2009).

Embora o pneu seja um material inerte, por não conter metais pesados em sua composição e não ser solúvel em água, e, portanto não sofrer lixiviação (carregamento pela água da chuva de materiais que são carregados ao lençol freático), sua deposição requer gerenciamento específico, pois o seu descarte não é fácil. Nos aterros sanitários o problema surge, pois os pneus absorvem os gases que são liberados pela decomposição dos outros resíduos, inchando-se e podendo até estourar, o que prejudica a cobertura dos aterros. Além disso, o material tem baixa compressibilidade, o que contribui com a redução da vida útil dos aterros (ODA e FERNANDES JÚNIOR, 2001).

## 2.2. Histórico produção de pneus

A humanidade, há mais de um século, tem usufruído dos pneumáticos de borracha que permitem a circulação dos veículos automotores. Ao longo do tempo os veículos foram produzidos em escalas cada vez maiores e como consequência também cresceu a indústria de pneus e o problema do destino final dos pneus usados, pois uma coisa é certa em algum momento o pneu se tornará inservível, ou seja, não terá mais condições de rodagem. As Figuras 4 e 5 demonstram exemplos de pneus inservíveis dispostos inadequadamente.



Figura 4 – Depósito de pneus inservíveis.

Fonte: Prefeitura Municipal de Goiânia (2009).



Figura 5 – Exemplo de pneus inservíveis descartados.

Fonte: Ciclovivo (2010).

A invenção do pneu remonta há mais de um século e possui fatos curiosos. A borracha, por exemplo, não passava de uma goma “grudenta” utilizada para impermeabilizar tecidos e apresentava sério risco de se dissolver quando exposta a temperaturas elevadas, foi aí que acidentalmente foi descoberto por Charles Goodyear o processo de vulcanização da borracha, em 1839, ao deixar cair enxofre em uma amostra de borracha que estava sendo aquecida (ANIP, 2010). A vulcanização, palavra derivada da mitologia romana (Vulcano, Deus do fogo e do trabalho com metais) é o termo utilizado para descrever o processo através do qual a borracha reage com enxofre para produzir uma rede de ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas.

Alguns anos mais tarde, em 1845, os irmãos Michelin foram os primeiros a patentear o pneu para automóvel. As etapas iniciais de desenvolvimento dos pneus ainda passaram pelo feito do inglês Robert Thompson que, em 1847, colocou uma câmara cheia de ar dentro dos pneus de borracha maciça. A partir de 1888, com a utilização do pneu em larga escala, as fábricas passaram a investir mais em sua segurança.

Atualmente além da borracha sintética, os pneus têm vários componentes, por ser um produto que tem como objetivo um longo tempo de vida útil, pois são “projetados e fabricados para durar em situações físicas, químicas e térmicas extremas, [...] apresenta uma estrutura complexa, com o objetivo de atribuir-lhes as

características necessárias ao seu desempenho e segurança, confeccionado para serem indestrutíveis” (KAMIMURA, 2002).

Já a produção brasileira de pneus ocorreu em 1934, quando foi implantado o Plano Geral de Viação Nacional. No entanto, a concretização desse plano aconteceu em 1936 com a instalação da Companhia Brasileira de Artefatos de Borracha – mais conhecida como Pneus Brasil – no Rio de Janeiro, que em seu primeiro ano de vida fabricou mais de 29 mil pneus.

Entre 1938 e 1941, outras grandes fabricantes do mundo passaram a produzir seus pneus no País, elevando a produção nacional para 441 mil unidades. No final dos anos 1980, o Brasil já tinha produzido mais de 29 milhões de pneus (ANIP, 2010).

Desde então, o Brasil conta com a instalação de 15 fábricas de pneus, das quais cinco internacionais: Bridgestone, Continental, Goodyear, Michelin e Pirelli (ANIP, 2010). A Figura 6 apresenta um mapa geral onde se esta localizado as principais fábricas brasileiras de pneus.



Figura 6 – Mapa com a localização das indústrias brasileiras.

Fonte: ANIP (2010).

A indústria brasileira de pneus produziu, em 2009, um total de 61,3 milhões de unidades, avaliadas em R\$ 9 bilhões, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2009).

As oito empresas associadas à Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP) produziram 53,8 milhões de unidades, montante que representa 87% da produção total brasileira de 61,3 milhões de pneus, de acordo com as estatísticas do IBGE.

Ainda de acordo com o IBGE, a produção brasileira de pneus em 2009 obteve queda de 14,43% em relação aos 12 meses do ano anterior. Já os dados da ANIP apontam para um desempenho um pouco melhor da produção brasileira de pneus, uma vez que apontam uma queda de 10% no mesmo período.

A Tabela 1 apresenta o resultado acumulado da produção de pneus nas duas principais modalidades (automóveis e carga) em 2009 e a taxa de crescimento da indústria, de acordo com os dados do IBGE e com os dados da ANIP, com a finalidade de comparação dos resultados.

Tabela 1 - Comparativo de produção de pneus acumulado entre IBGE e ANIP.

<b>Janeiro a dezembro 2008 (%)</b>	<b>Automóveis e utilitários (em mil unidades)</b>	<b>Ônibus e Caminhões (em mil unidades)</b>	<b>Janeiro a dezembro 2009/2008 (%)</b>
IBGE	32.256	8.774	- 14,4%
ANIP	27.492	6.034	-10%

Fonte: ANIP (2010).

A Tabela 2 apresenta a produção total de pneus, considerando nas categorias o consumo para: aviões, automóveis, caminhões, caminhonetes, máquinas de terraplanagem, motos, ônibus, veículos industriais e tratores.

Tabela 2 - Volume de produção de pneus (unidades produzidas).

<b>Volume de Produção: (unidades de pneus)</b>	<b>Produção total de Pneus</b>
2009	53,8 milhões
2008	59,7 milhões
2007	57,3 milhões
2006	54,5 milhões

Fonte: ANIP (2010).

Muitos são os tipos de pneus devido a sua aplicação em diferentes veículos. Os mais comuns, e em maior quantidade, são os pneus para automóveis, caminhões, ônibus, utilitários leves (pick-ups e vans), motocicletas e bicicletas. Também são fabricados pneus especiais para aviões, veículos de competição esportiva, tratores agrícolas, equipamentos de construção e de movimentação de materiais. Na maior parte destes tipos de usos os pneus são preenchidos por ar comprimido, numa câmara de borracha inserida dentro do pneu, porém, nos últimos anos cresceu a aplicação de pneus sem câmara, principalmente nos automóveis, com o ar comprimido diretamente no interior do pneu. Há, também, pneus de borracha sólida, chamados "pneus maciços" com aplicação restrita a alguns veículos industriais, agrícolas e militares.

Um pneu é construído, basicamente, de uma mistura de borracha natural e de elastômeros (polímeros com propriedades físicas semelhantes à da borracha natural), também chamados de "borrachas sintéticas". A Figura 7 descreve, em porcentagem, os itens que fazem parte da composição de pneus radiais para automóveis.

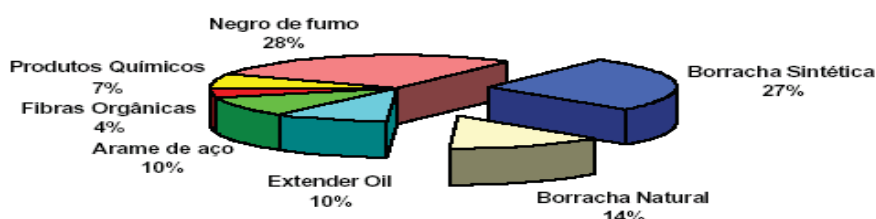


Figura 7 - Composição de pneus radiais para automóveis.

Fonte: Paula (2004).

A adição de negro de fumo confere à borracha propriedades de resistência (mecânica e à ação dos raios ultravioleta), durabilidade e desempenho. A mistura é espalmada em um molde e, para a vulcanização (feita a uma temperatura entre 120° C e 160°C) utiliza-se: o enxofre, compostos de zinco como aceleradores e outros compostos ativadores e antioxidantes. Um fio de aço é embutido no talão, que se ajusta ao aro da roda e, nos pneus de automóveis do tipo radial, uma manta de tecido de nylon reforça a carcaça e a mistura de borracha/elastômeros é espalmada, com uma malha de arame de aço entrelaçada nas camadas superiores. As Figura 8 e 9, mostram em diferentes ângulos as partes de um pneu e seus respectivos componentes.

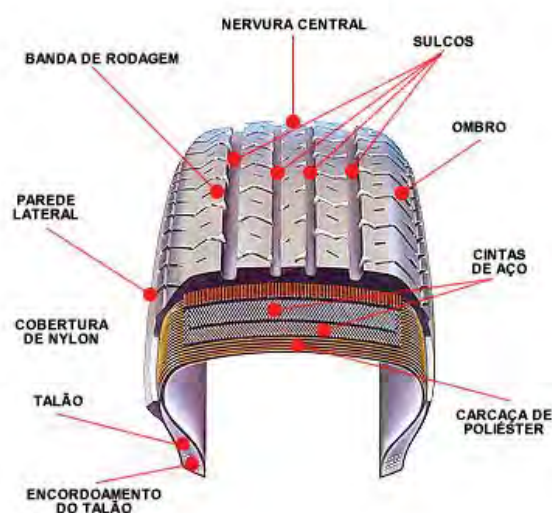


Figura 8 – Partes de um pneu radial, com apresentação da nomenclatura usada.

Fonte: Andrietta (2002).

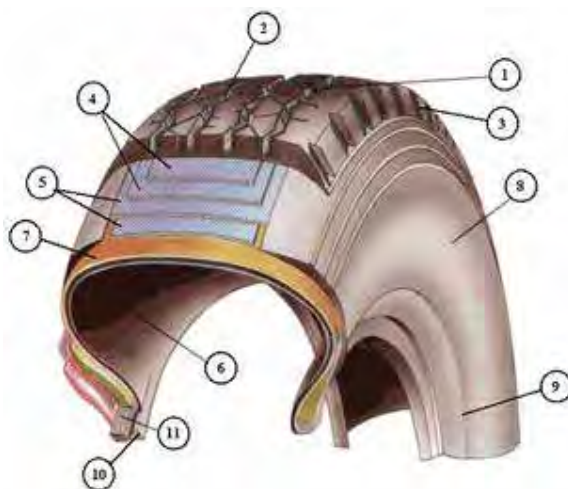


Figura 9 – Apresentação das partes que compõem o pneu.

Fonte: Fabricante Bridgestone (2010).

Ao analisar-se a Figura 9, pode-se definir os índices numéricos:

1. Banda de rodagem – é a parte do pneu que entra em contato com o solo;
2. Sulcos – são as cavidades que recortam a superfície da banda de rodagem;
3. Ombros – são partes do pneu entre a banda de rodagem e os flancos. Lona(s) ou cinta(s) de proteção;
4. Parte exterior da estrutura resistente do pneu – tem a finalidade de proteger as lonas/cintas de trabalho;
5. Lonas ou cintas de trabalho – são as partes do exterior da estrutura resistente do pneu radial que tem a finalidade de estabilizar o pneu;
6. Revestimento interno – é toda a superfície interna do pneu, constituída de componentes de borracha que tem a função de proteção;
7. Interior da estrutura – é a parte resistente do pneu cujos cordonéis estendem-se de um talão a outro;
8. Flancos ou laterais – são as partes do pneu compreendidas entre os limites da banda de rodagem e os talões, também conhecido como flanco costado;
9. Cordão ou filete de centragem – é a linha em relevo próxima da área dos talões que tem a finalidade de indicar visualmente a correta centralização do pneu no aro;
10. Talões - são partes do pneu que entram em contato com o aro, garantindo a sua fixação ao mesmo na Figura 9 o talão da direita é de um pneu sem câmara;
11. Aro do talão – é o elemento metálico interno (carcaça), estrutura resistente formada por um conjunto de lonas e eventuais cintas de proteção ou de trabalho (BRIDGESTONE, 2010).

Além da complexibilidade na fabricação de um pneu, também há a complexibilidade nos processos de fabricação de seus componentes. O fluxograma apresentado na Figura 10 mostra as matérias primas e suas origens, empregadas no processo de fabricação de um pneu automotivo.

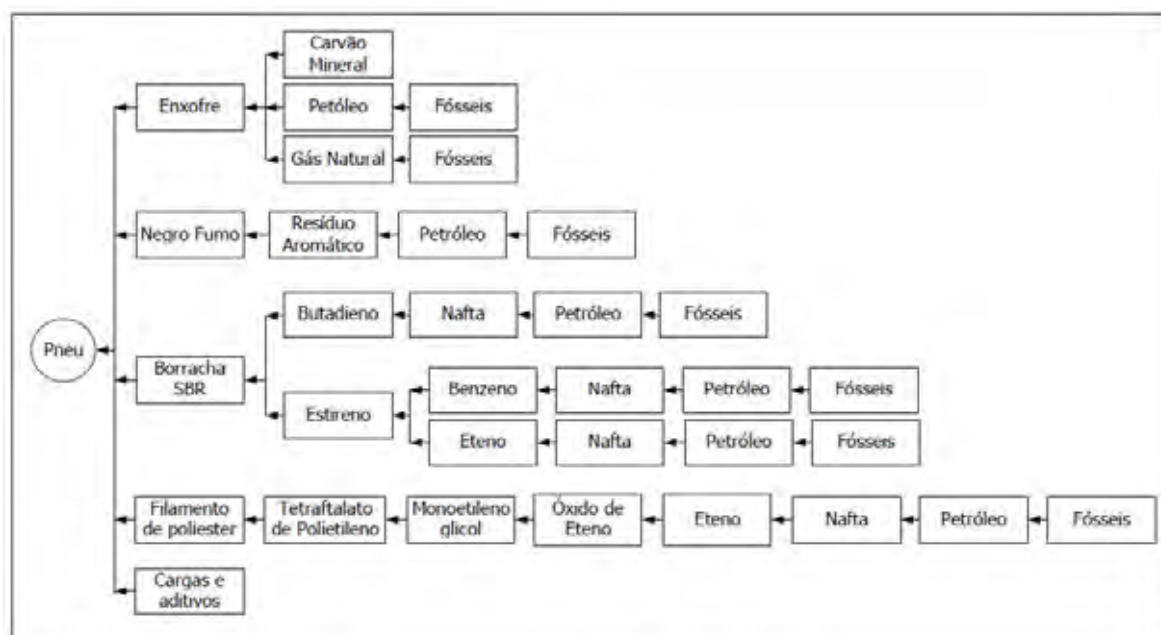


Figura 10 - Matérias primas empregadas na fabricação dos pneus automotivos.

Fonte: Adaptado de Abiquim (2011).

O grande desafio ambiental no descarte final dos pneus se dá pelo alto grau de complexidade da composição dos mesmos, uma vez que diariamente são fabricados e ao mesmo tempo descartados milhões de pneus no mundo, além disso, um pneu descartado na natureza leva em torno de 600 anos para decompor.

O Brasil é o detentor da maior frota de veículos dos países em desenvolvimento e, portanto, um destino em potencial para os pneus usados europeus. Pneus de automóveis só podem ser reformados uma única vez, o que significa que os pneus usados importados da Europa podem ser reformados uma única vez e se transformarão em lixo no Brasil. Se o governo brasileiro permitir a entrada de pneus reformados, os europeus encontrarão no território brasileiro uma alternativa para destinar os pneus, que antes eram dispostos nos aterros sanitários (MATTOS, 2006).

Na Figura 11 pode-se destacar alguns possíveis destinos que são dados aos pneus inservíveis.

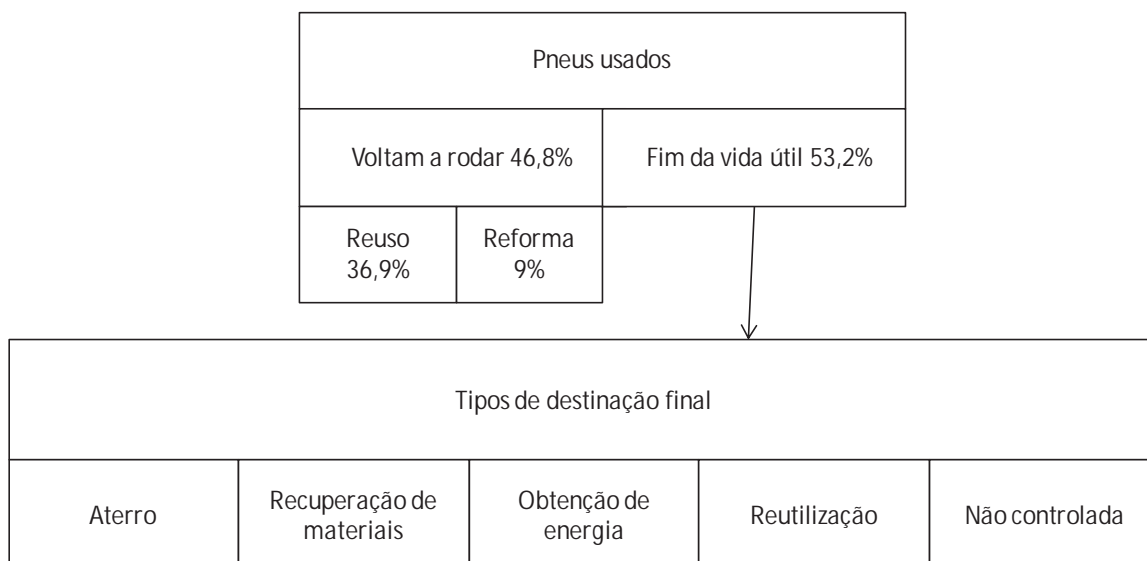


Figura 11 - Destinos possíveis para pneus usados e inservíveis.

Fonte: Faria (2006).

No âmbito dos pneus descartáveis, o crescente risco ambiental associado ao acúmulo desse material culminou na criação de legislação específica em diversos países. Nos Estados Unidos, as leis estaduais regulamentaram a aquisição, armazenagem e processamento dos pneus, impondo restrições para armazenagem em aterros sanitários e oferecendo incentivos para o desenvolvimento de novas alternativas de uso. Com isto, o mercado de pneus descartados tornou-se mais fortalecido (RESCHNER, 2002; RUBBER, 2006).

O Japão, por razões de espaço e de cuidados na preservação do meio ambiente, é o país mais adiantado na reciclagem de pneus usados, adotando um modelo integrado de soluções que possibilitam o aproveitamento de cerca de 91% do volume total do seu resíduo gerado. Em 2000, o Japão já teria zerado seu passivo ambiental (FILHO, 2007).

Considerando que a geração de pneus inservíveis apresenta uma relação direta com a frota de veículos, os Estados Unidos são os que mais geram pneus inservíveis, seguidos da União Europeia, Japão e China.

Diante do acúmulo de pneus dispostos inadequadamente em aterros sanitários, diversos países vêm adotando medidas e políticas de destinação dos pneus descartados. Em 1999, a União Europeia estabeleceu que, a partir de 2003 pneus inteiros não poderiam ser colocados em aterros e, a partir de 2006, nem

mesmo os pneus fragmentados, embora não tenha sido implantada nenhuma política de destinação após este prazo (ANDRIETTA, 2006).

De acordo com SOLID WASTE (2000), os pneus quando aterrados emergem nos taludes, pois, nestas áreas a terra tende a ser menor compactada tornando mais fácil a subida do pneu à superfície. Outro problema com relação à presença de pneus em aterros, apresentado pela agência ambiental Inglesa EA - UK (2000) é a ocorrência de fogo que, se descontrolado, pode ocasionar uma pirólise dos pneus que pode produzir uma complexa mistura de substâncias químicas, além disso, o Reino Unido não permite a entrada de pneus em aterros. No Brasil, segundo a resolução CONAMA nº 416/2009, o descarte de pneus em aterros sanitário é proibido.

No entanto, é importante frisar que nem todos os pneus podem passar pelo processo de reforma. Para ocorrer à reforma é necessário que a estrutura do pneu esteja intacta para que ele cumpra sua função original quando for reutilizado, além disso, a questão da segurança não deve estar comprometida (ALMEIDA *apud* KAMIMURA, 2002).

Devido a todos esses inconvenientes que o pneu inservível provoca é necessária a busca por formas de reutilização que vão além da reforma (recauchutagem). Um dos exemplos que pode-se citar dessa busca é o trabalho de Rodrigues (2008), que propõe a produção de um compósito com resíduo da borracha de pneu com uma resina poliuretana derivada de óleo de mamona, pois esta resina possui a vantagem de ser um material obtido a partir de um recurso natural e renovável, ainda segundo Rodrigues (2008), algumas vantagens podem ser obtidas utilizando resinas poliuretanas derivadas de óleo de mamona associadas aos resíduos de borracha de pneus, na produção de compostos para a construção civil: redução do volume de resíduos de pneus no meio ambiente; redução na extração de recursos naturais; utilização de fonte renovável; redução do custo do compósitos produzidos pelo menor consumo de energia na sua fabricação, em relação ao processo convencional na regeneração da borracha.

Essa prática demonstra a possibilidade de associar desenvolvimento tecnológico com desenvolvimento sustentável, por meio de ações que promovam a sustentabilidade, levando à preservação dos recursos naturais, e equilibrando o meio ambiente.

### 2.3. Legislações aplicáveis aos pneus inservíveis

As primeiras regulações envolvendo pneus surgem nos anos 90 como normas voltadas para prevenir a geração de resíduos de pneus. Em 1991, o Brasil proibiu a importação de bens de consumo usados, dentre os quais os pneus, por meio da Portaria número 8 da Secretaria do Comercio Exterior - SECEX. No ano de 2000, a portaria 8 da SECEX proibiu a concessão de licenças para a importação de pneus recauchutados (reformados) e usados, como bem de consumo ou matéria-prima, utilizando o argumento de que estes pneus entrariam no país com vida útil curta e logo se transformariam em passivo ambiental. Em 2002, esta portaria foi alterada para permitir as importações de pneus remoldados provenientes dos Estados partes do Mercado Comum do Sul (Mercosul), devido a uma decisão do Tribunal Arbitral do Mercosul que obrigou o Brasil a autorizar a importação pneus remoldados.

O problema gerado pelos pneumáticos inservíveis gerou a necessidade de se instituir legislação específica, a Resolução CONAMA nº 258/1999, que estabeleceu metas e procedimentos para o gerenciamento ambientalmente adequado desses inservíveis, complementada pela Instrução Normativa nº 08/02, do IBAMA, tendo alguns dispositivos alterados pela Resolução CONAMA nº 301 / 02.

A legislação ambiental atribui à competência do controle, fiscalização e a edição dos atos normativos pertinentes aos pneumáticos inservíveis ao IBAMA. Contudo, na Instrução Normativa nº 08/02, o IBAMA esclarece que sua competência refere-se apenas ao cadastramento dos responsáveis diretos, acrescido dos processadores e destinadores finais de pneus de veículos automotores e de bicicletas. Estes devem comprovar as quantidades eliminadas de pneus inservíveis, por meio de Relatório de Atividades para que seja verificado o cumprimento das metas estabelecidas pela mencionada Resolução CONAMA.

Essas Resoluções baseiam-se no princípio do poluidor pagador. Os importadores, de pneus novos e reformados, e os fabricantes foram obrigados a implantar ações operacionais de coleta, tratamento e disposição final desses inservíveis, em conformidade com as metas e procedimentos estabelecidos por essas legislações.

Nas legislações pesquisadas verifica-se que alguns Estados da União instituíram legislação pertinente à matéria, estabelecendo diretrizes complementares

à legislação ambiental federal em vigor. Porém, não incluíram apoio ou incentivo aos municípios, no que concerne à criação de fundos com vistas a subsidiar o desenvolvimento e implantação de alternativas tecnológicas afetas as estratégias de minimização de pneus inservíveis, que também não são contempladas na legislação federal (RESOL, 2002).

Quanto às legislações municipais referentes a pneumáticos inservíveis pesquisadas, observa-se que apenas três municípios (São Paulo/SP, Salvador/BA e Rio de Janeiro/RJ) estabeleceram a possibilidade de implementarem alternativas tecnológicas, com vistas à minimização desses resíduos. Entre estes, apenas o Município de São Paulo estabeleceu que pode instituir linhas de financiamento para esse fim, relativas a projetos de economias solidárias.

Dessa forma, sugere-se que por ocasião da revisão da Resolução CONAMA nº 258/99, seja incluso a criação de incentivos, que promovam o desenvolvimento de pesquisas, visando contribuir para a minimização de pneumáticos inservíveis dispostos inadequadamente.

É interessante destacar que a partir destas resoluções, ações institucionais foram sendo criadas pelas empresas em parceria com as associações de pneumáticos em âmbito nacional - a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), aliada a Associação Brasileira dos Fabricantes, Distribuidores e Importadores de pneus de bicicletas, peças e acessórios (ABRIDUPI), pelos fabricantes, e a Associação Brasileira da Indústria de Pneus Remoldados (ABIP), representante dos importadores, houve um maior engajamento entre os responsáveis diretos e estas entidades representativas (CIMINO, 2005).

Entre as demais questões abordadas na Resolução 258/99, o CONAMA afirma que tanto as empresas importadoras de pneus novos ou remoldados, como as fabricantes de pneus novos, deverão prestar contas ao IBAMA quanto à destinação final dos pneus inservíveis, pois conforme o artigo 9º fica terminantemente proibido o descarte desse resíduo sólido nos aterros sanitários; no mar; em terrenos baldios ou alagadiços; margens de vias públicas; em cursos d' água e em praias; ou ainda a queima a céu aberto.

## 2.4. Resolução atual

A Resolução 416/09 do CONAMA, em setembro de 2009 e publicada no dia 1º de outubro no Diário Oficial da União, texto de Resolução nº 416/09 substitutivo da Resolução Conama nº 258/99 e nº 301/02, que disciplina a obrigação de destinação ambientalmente adequada de pneus inservíveis pelas empresas fabricantes e importadoras de pneus.

De acordo com o novo texto dessa Resolução, “para cada pneu novo comercializado no mercado de reposição, as empresas fabricantes ou importadoras deverão dar destinação correta, a um pneu inservível”, excluindo-se dessa obrigação, os reformadores, pois estes já desenvolvem atividades que contribuem para a preservação ambiental, tendo em vista que promovem a extensão da vida útil de pneus usados.

Nesse sentido, firmou-se que somente os fabricantes e os importadores de pneus novos geram o aumento do número de pneus no Brasil, não contribuindo em nada, para os reformadores, o que justifica a sua exclusão de responsabilidade.

Os municípios com mais de cem mil habitantes poderão contar com um ponto de coleta, no mínimo, implementados pelos fabricantes e importadores de pneus novos, que terão até um ano para adotarem os procedimentos. Onde não houver ponto de coleta, serão atendidos por esses fabricantes e importadores que terão a obrigação de divulgar, por meio de um plano de gerenciamento de coleta, o armazenamento e destinação de pneus usados (PGP), aos órgãos do Sistema Nacional do Meio Ambiente – Sisnama (ABR, 2009).

De acordo com a Resolução Nº 416 o pneu inservível é classificado como: “Pneu usado que apresente danos irreparáveis em sua estrutura não se prestando mais à rodagem ou à reforma”, ainda de acordo com essa mesma resolução deve o pneu inservível receber uma destinação ambientalmente adequada de pneus inservíveis; com procedimentos técnicos em que os pneus são descaracterizados de sua forma inicial, e que seus elementos constituintes são reaproveitados, reciclados ou processados por outras técnicas admitidas pelos órgãos ambientais competentes, tais como observando a legislação vigente e normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, e a minimizar os impactos ambientais adversos, (MMA, 2010).

Após o pneu se tornar inservível ele pode receber vários destinos, que vão do descarte incorreto e irresponsável em locais inadequados até formas corretas de destinação que deve ser deixado em um estabelecimento comercial como uma revenda de pneus ou em uma borracharia ou em um Ponto de Coleta de Pneus da Prefeitura Municipal.

Segundo Morilha Jr. e Greca (2003), a destinação correta de pneus inservíveis pode ser:

➤ Redução na fonte:

A reciclagem de pneus envolve um ciclo que compreende a coleta, o transporte, a trituração e a separação de seus componentes (borracha, aço, náilon ou poliéster), transformando sucatas em matérias primas para o mercado (BERTOLLO; FERNANDES JR. e SCHALCH, 2002).

Segundo Hackbart e Lima (1999), há uma grande diferença, em termos de passivo ambiental, entre tratar o resíduo e em “coletar e dar destinação final adequada”. O tratamento consiste em se adotar técnicas que visem reduzir o volume dos resíduos em sua massa e quantidade, minimizar sua periculosidade e/ou inertizá-lo antes de sua disposição final adequada. Para exemplo de tratamento temos o programa de minimização de resíduos. Esse programa consiste em reduzir a geração de resíduos na sua fonte geradora através de técnicas que levem a empresa fabricante a adotar as seguintes mudanças em sua linha de produção:

- Alteração dos materiais utilizados;
- Alteração tecnológica no processo produtivo;
- Mudanças nos procedimentos operacionais;
- Substituição de produtos auxiliares, tais como solventes e agregantes;
- Reuso de material;
- Reciclagem.

Outra forma de diminuir o número de pneus inservíveis é aumentar sua vida útil, através novas tecnologias de produção.

Uma iniciativa que merece destaque nesse cenário é a RECICLANIP, uma entidade civil sem fins lucrativos formada pela Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos que foi criada em março de 2007 pelos fabricantes de pneus novos (Bridgestone, Goodyear, Michelin e Pirelli) e, em 2010 a Continental juntou-se à entidade.

A RECICLANIP é considerada uma das maiores iniciativas da indústria brasileira na área de responsabilidade pós-consumo. O trabalho de coleta e destinação de pneus inservíveis realizado pela entidade é comparável aos maiores programas de reciclagem desenvolvidos no País, em especial o de latas de alumínio, garrafas PET e embalagens de defensivos agrícolas.

Desde 1999, quando começou a coleta dos pneus inservíveis pelos fabricantes, mais de 1,3 milhão de toneladas de pneus inservíveis, o equivalente a 270 milhões de pneus de passeio, foram coletados e destinados adequadamente. Além disso, os fabricantes já investiram mais de US\$ 114 milhões (valor até julho de 2010) para coleta e destinação de pneus inservíveis (RECICLANIP, 2010).

➤ **Recapagem, Recauchutagem e Remoldagem:**

Depois do combustível, os pneus constituem o item de maior custo de uso dos veículos, daí vem à importância da sua reutilização, mas para isso é necessário que a estrutura geral do pneu esteja conservada, não apresentando cortes ou deformações, e a banda de rodagem ainda apresente os sulcos e saliências que permitem sua aderência ao solo. Uma limitação para esse tipo de reciclagem é a econômica, uma vez que a reforma de um pneu de caminhão custa em torno de um terço de um novo, e um pneu reformado de automóvel pode custar até 60% de um novo. Apesar dessas limitações o Brasil é um dos maiores remoldadores de pneus do mundo. A Associação dos Recauchutadores, Reformadores e Remoldadores (ABR) revela que o setor movimentava cerca de R\$ 3,2 bilhões por ano, gerando uma economia anual de R\$ 600 milhões em derivados de petróleo (Gazeta Mercantil, 2003). Os processos de recapagem, recauchutagem e remoldagem podem ser definidos como:

Recapagem: consiste na remoção da banda de rodagem, no reparo estrutural da carcaça com cordões de borracha e na utilização de cimento para colar a banda de rodagem na carcaça. Os ombros dos pneus não são removidos neste processo.

Recauchutagem: consiste na remoção da banda de rodagem e dos ombros do pneu. Existem dois processos para recauchutagem dos pneus: o processo a frio um método mais eficiente e a recauchutagem a quente, que demanda menos espaço e oferece um ganho de produtividade. O processo a frio utiliza bandas pré-curadas que são coladas nas carcaças após os reparos das mesmas. São utilizados outros

componentes para o reparo e união entre a carcaça e a banda de rodagem, que são: o coxim, que é uma lâmina fina de borracha que vai entre a carcaça e a banda pré-curada; e o cordão de borracha utilizado para preencher furos e danos estruturais do pneu. Para a recauchutagem a quente é utilizada uma manta de borracha, na qual é necessária a utilização de moldes para a vulcanização e a formação do desenho na banda de rodagem.

**Remoldagem:** Consiste em remover a borracha das carcaças, de talão a talão, em seguida o pneu é totalmente reconstruído e vulcanizado, sem qualquer emenda, proporcionando balanceamento, apresentação e segurança de uso (ABIP, 2009).

Na Europa a recapabilidade restringiu-se a uma reforma por pneu, além disso, a atividade de reforma é considerada “verde” e as empresas recebem incentivos para a montagem de empresas de reforma de pneus (RUBBER, 2005). Já no Estados Unidos poucos pneus de automóvel são reformados devido a fatores econômicos e também pela percepção do consumidor, que os pneus de automóvel recauchutados são inseguros. Os Estados Unidos importam grande parte dos pneus usados da Europa e do Japão para a reforma (ABIP, 2007).

A Tabela 3 mostra um cenário mundial do custo e número de reformas que o pneu é submetido.

Tabela 3 - Custo da reforma dos pneus no mercado mundial e no Brasil.

<b>Reformado/novo</b>	<b>Custo Mercado mundial</b>	<b>Custo Brasil</b>	<b>Quantidade de reformas</b>
Carga (ônibus caminhão)	33 a 50%	18 a 25%	2
Automóvel	40 a 50%	40 a 50%	1
Moto	-	33%	1
Avião	-	-	8

Fonte: Reciclanip (2007).

Conforme pode-se visualizar na Tabela 3, uma das categorias que mais reforma pneus é a aviação, sendo 85% dos pneus de avião reformados, com a participação de todas as Companhias Aéreas (ABIP, 2005).

O pneu depois de reformado apresenta rendimento semelhante ao pneu novo, com custo 70% menor; os pneus de carga são reformados em média duas vezes, gerando três vidas para cada carcaça; economizam 57 litros de petróleo por pneu reformado, ou seja, representa uma economia de 798 milhões de litros de óleo

diesel/ano no Brasil; postergam a destinação final da carcaça, reduzindo com isso os impactos negativos ao ambiente.

➤ Queima de pneus em caldeira:

As caldeiras podem trabalhar com óleo mineral de baixo ponto de fluidez (BPF), Óleo combustível pesado, lenha, bagaço e atualmente estão trabalhando com pneus inservíveis. Os pneus inservíveis estão sendo utilizados como combustível para caldeiras desde 2003. O consumo médio é de 150 mil pneus usados por mês. O processo utiliza 5% em massa de pneus inservíveis triturados e 95% em massa do bagaço da cana-de-açúcar, e o poder calorífico da mistura chega próximo a 2150 kcal/kg, gerando um vapor de baixa-pressão. A alimentação nas caldeiras é feita através de silos dosadores de pneus triturados e bagaço de cana-de-açúcar. O custo para a queima dos pneus usados nas caldeiras é cerca de US\$ 14 por tonelada (COCAMAR, 2007).

Segundo Reis e Ferrão (2002), vários estudos já comprovaram que a queima a céu aberto, independente da quantidade, gera emissões com um efeito mutagênico e danoso a saúde humana.

A Environmental Protection Agency - EPA fez uma simulação de queima de pneus usados em uma câmara de combustão controlada, realizando um estudo sobre todas as emissões produzidas. Estas emissões caracterizam uma queima real, porém suas concentrações podem não ser representativas. Os dados apresentados revelaram que as emissões de compostos orgânicos semivoláteis representavam entre 10 a 50 g/kg do pneu queimado, sendo maiores as emissões de hidrocarbonetos mono e poliaromáticos. Verificaram-se, ainda, emissões de outros compostos, como o benzeno, em concentrações maiores que 1 ppm, podendo constituir um grande risco a saúde pública. Registrou-se também a presença de zinco e chumbo nas emissões gasosas (EPA, 2006). Analisando esses resultados torna-se evidente que a queima em caldeira não é o melhor destino para os pneus inservíveis.

➤ Coprocessamento – Geração de energia:

A queima de pneus velhos em fornos controlados é uma alternativa rentável de reaproveitamento, pois cada pneu contém uma energia embutida de 9,4 l de petróleo (CEMPRE, 2008). Pneus inteiros ou processados têm sido utilizados como

fonte de energia desde 1975, primeiramente, verificados nos Estados Unidos – EUA, em caldeiras de indústrias de papel e celulose e em termoelétricas. Os EUA consomem cerca de 115 milhões de pneus inservíveis por ano (RUBBER, 2000).

No Brasil, a queima direta de pneus é muito utilizada na fabricação de cimento. Na Inglaterra a incineração é realizada nas usinas termoelétricas (SANTOS et al., 2004). A emissão de gases tóxicos com altas concentrações de enxofre e amônia constitui grande inconveniente da queima da borracha em caldeiras. O uso do coprocessador é uma alternativa para minimizar esse impacto ambiental, possibilitando a queima de resíduos industriais em fornos de cimento nos quais os resíduos são usados para gerar energia. A queima de resíduos industriais a 1700 °C transforma quimicamente as substâncias perigosas, fazendo com que as emissões de gases na atmosfera sejam menos poluentes. As cinzas resultantes são incorporadas ao cimento e ficam encapsuladas em concentrações aceitáveis.

O co-processamento de pneus em fornos de clínquer é uma forma segura para a disposição final deste material, pois os pneus apresentam condições favoráveis, tais como alta temperatura, elevado tempo de residência (que evita a liberação de emissões), alto efeito de absorção da matéria-prima no pré-aquecimento e a incorporação das cinzas geradas ao clínquer.

Esse processo contribui para a diminuição do consumo de combustíveis não-renováveis, como o carvão e o óleo, poupando, dessa forma os recursos naturais. Nestas aplicações os pneus são usados em combinação com o carvão, substituindo o mesmo em até 25% (SOUZA, 2000 e RUBBER, 2000).

Em diversas fábricas de cimento nos Estados Unidos, Europa e Japão é utilizado co-processamento do pneu em forno de clínquer, que comprovaram que esta prática não gera subprodutos poluentes, não afeta o processo de produção, não prejudica a qualidade dos produtos (clínquer e cimento) e não provoca emissões atmosféricas significativas (SOUZA, 2000).

- Reutilização do pneu inservível em sua forma inteira: alternativas de reciclagem:

Nestes processos para a reciclagem dos pneus inservíveis não é necessário a separação dos componentes do pneu ou a própria trituração antes de sua utilização. Os pneus inservíveis são utilizados em sua forma inteira contribuindo para a questão da destinação final deste resíduo.

Alguns projetos viáveis e observados no mercado serão apresentados e comentados a seguir:

- **Em Obras de drenagem:** Os pneus são unidos em módulos de aproximadamente 15 pneus e formam um tubo que substitui aos bueiros. Segundo Kamimura (2002), esta prática tem sido adotada nos EUA e apresentou desempenho aceitável. Na Figura 12 tem-se um exemplo de uma obra de contenção da Prefeitura de Divinópolis no estado de São Paulo- Brasil.



Figura 12 – Exemplo de uma obra drenagem com pneus inservíveis.

Fonte: Prefeitura de Divinópolis (2007).

- **Em Muros de arrimo/contenção:** As camadas horizontais de pneus são espaçadas verticalmente e interligada com alças de metal, formam camadas e são preenchidas com solo. No Brasil a PUC-Rio em parceria com Universidade de Ottawa (Canadá) e a Fundação Geo-Rio, vem desenvolvendo este projeto de pesquisa, com a meta de estabilizar taludes com muros de contenção (KAMIMURA, 2004);

- **Em Limitação Território Esportivo:** Os pneus podem formar muros de limitação de territórios para prática de esportes automotivos de alta velocidade, com também, em pistas de corridas de cavalos (RAMOS, 2005);



Figura 13 – Exemplo de uma Pista de Kart.

Fonte: Ramos (2005).

- **Em Construção de barragens:** Os pneus inteiros podem ser utilizados na construção de barragens para contenção. Existe um projeto do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Texas – EUA com esta finalidade (SALINI, 2000);
- **Em Recifes artificiais:** Os pneus de carros e caminhões empilhados de 15 a 25 unidades são comprimidos, e fixados com uma mistura de cimento, e depois são lançados sobre o leito do mar para formar recifes artificiais”, auxiliando na criação e reprodução de animais marinhos, pois se transformam em um ambiente propício para a fauna e a flora (RAMOS, 2005 e KAMIMURA, 2004);
- **Em Quebra-mares:** A construção de quebra-mares com pneus descartados pode ser um recurso facilmente aplicável, onde pneus devem proteger os portos e as marinas dos efeitos das marés, gerando estabilidade para o solo marinho e para a praia, além de possibilitarem a estabilização de dunas existentes (SANDRONI, 2005);
- **Em Contenção de erosão do solo** – Os pneus inteiros associados a plantas de raízes grandes, podem ser utilizados para ajudar na contenção da erosão do solo (MARTINS, 2004);
- **Em Enchimento de Aterros:** Os pneus picados ou inteiros podem substituir parte do agregado com baixo custo e mantêm o solo com boa drenagem (RAMOS, 2005);

- **Em Reforço de aterros** – Os pneus radiais amarrados com fitas de poliéster é uma matéria-prima barata e eficiente para a construção de aterros sem comprometer a qualidade da obra (MARTINS, 2004);

- **Em Construção de casas com pneus inteiros “Earthship”**: Esta técnica de construção natural utiliza-se de pneus e solos prensados na confecção de paredes que são assentados diretamente no solo (sem vegetação). Uma casa no Japão já foi construída através deste método; e no Brasil o Instituto de Permacultura já construiu uma parede através deste método (KAMIMURA, 2004);

- **Em Galerias de águas pluviais**: Os pneus descartados estão sendo utilizados para a construção de galerias pluviais em substituição às manilhas de cimento, esta experiência está sendo utilizada pela prefeitura da cidade Araçoiaba da Serra (SP), e prefeitura de Cascavel (PR), ambas utilizaram esta experiência e se beneficiaram com a redução do custo do material empregado na obra (AREBOP, 2009);

- **Em Móveis e obras de arte feitos com pneus**: Os pneus inteiros são utilizados como material na confecção de móveis e obras de arte (Figura 14).



Figura 14 - Exemplos de móveis e obras de obras de arte.

Fonte: site <http://artesanatoempneus.blogspot.com> (2010).

É importante frisar que estas alternativas descritas contribuem na destinação final dos pneus inservíveis, pois não utilizam em larga escala o estoque de pneus descartados que existe, os processos com aplicação de tecnologias mais complexas são as que incorporam a maior quantidade de pneumáticos inservíveis.

➤ **Asfalto Borracha:**

Considerada uma das melhores alternativas para os pneus inservíveis o Asfalto Borracha vem ganhando espaço no cenário mundial, desde 1963, quando Charles H. McDonald, considerado o pai do sistema asfalto-borracha (asphalt-rubber) nos Estados Unidos, trabalhando para a indústria Sahuaro Petroleum, iniciou uma pesquisa com o intuito de desenvolver, com a incorporação de borracha moída, um material “altamente elástico” para ser aplicado na manutenção da superfície de pavimentos asfálticos.

Suas pesquisas resultaram no desenvolvimento de um produto composto de ligante asfáltico e 25% de borracha de pneu moído, misturados a uma temperatura de 190°C durante 20 min, para ser utilizado em reparos de estradas. Esse produto, denominado “*band-aid*”, foi utilizado também como selante de trincas e como camada de reforço (através do processo denominado Stress Absorbing Membrane Interlayer, SAMI), (HICKS, 2002).

Segundo Heitzmans (1992), 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 por reflexão. McDonald 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. 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. Até o início da década de 90 já existiam 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 e FERNANDES JUNIOR, 2001).

Como, o tema asfalto borracha é o foco principal desse trabalho, nos próximos tópicos serão detalhadas as utilizações e aplicações dos pneus inservíveis.

### **3. Utilização de pneus inservíveis em asfalto: Asfalto borracha**

Esse tópico irá apresentar o asfalto borracha: asfaltos (ligantes asfálticos e composição química), asfaltos modificados com polímeros SBS - (**S**tyrene **B**utadiene **S**tyrene, EVA - **E**tileno **A**cetato de **V**inila e borracha pneu moído), além dos processos de incorporação de borracha moída dos pneus inservíveis em asfaltos, suas vantagens e as obras já realizadas.

#### **3.1. Asfalto (ligante asfáltico, cimento asfáltico de petróleo - CAP)**

O asfalto, ou ligante asfáltico é obtido industrialmente pelo processo de destilação do petróleo bruto. No mercado existem mais de 1000 tipos de petróleo bruto, mas apenas cerca de 10% podem produzir ligantes asfálticos, pois para produção de ligantes é necessário que o petróleo bruto seja bastante pesado, ou seja, sua densidade deve ser próxima de um (LAMONTAGNE, 2002).

Os asfaltos são materiais aglutinantes de cor escura e constituídos por misturas complexas de hidrocarbonetos não voláteis de elevada massa molecular, são provenientes do petróleo, no qual estão dissolvidos e a partir do qual podem ser obtidos, seja pela evaporação natural de depósito localizado na superfície terrestre (asfaltos naturais), seja por destilação em unidades industriais especialmente projetadas que recebem o nome de refinarias (IBP, 1999). As refinarias possuem torres, onde o petróleo bruto é inicialmente destilado sob pressão a fim de separar as frações mais voláteis (gás, gasolina, diesel, nafta e querosene) das mais pesadas (óleos e asfalto). O resíduo desta destilação é denominado de resíduo asfáltico, e quando analisado pelas especificações brasileiras, passa a ter o nome de Cimento Asfáltico de Petróleo ou como CAP. Em pavimentação pode ser denominado de várias formas (CAP, ligantes asfálticos, cimentos asfálticos ou materiais asfálticos). Segundo as citações contidas no Manual do asfalto o CAP a temperatura ambiente é semi-sólido, e de cor preta.

A Figura 15 apresenta, de forma simplificada, o processo de obtenção do asfalto.

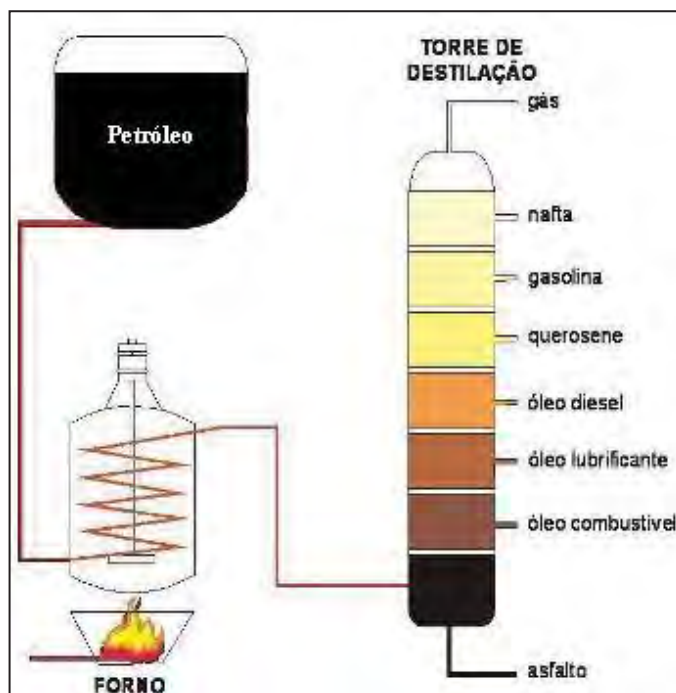


Figura 15 – Processo resumido da obtenção de asfalto.

Fonte: site <http://www.infoescola.com/quimica/asfalto/> (2010).

Conforme pode ser verificado na Figura 15 após a destilação do petróleo bruto (processo esse que ocorre sobre pressão), o mesmo é submetido à torre de destilação onde é separado de acordo com sua volatilidade (seu peso específico), as frações mais voláteis (gás, gasolina, diesel, nafta e querosene) vão para o topo da torre, enquanto as mais pesadas (óleos e asfaltos), são depositadas no fundo da torre, esse resíduo da destilação no fundo da torre da origem ao asfalto.

A classificação ou especificação de um asfalto envolve as análises das características reológicas, físicas e químicas. No Brasil os cimentos asfálticos do petróleo têm o símbolo CAP (**C**imento **A**sfáltico do **P**etróleo) que deve preceder às indicações de vários tipos, conforme sua classificação por penetração, de acordo com o especificado na norma DNIT – EM 095 (2006). A Tabela 4 apresenta as atuais especificações dos cimentos asfálticos brasileiros, classificados por penetração.

Tabela 4 - Especificação brasileira de ligantes asfálticos.

Características	Unidade	Especificações				Métodos		
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200	DNER (ME)	ABNT (NBR)	ASTM
Penetração (100 g; 5 s; 25 °C)	0,1 mm	30 45	50 70	85 100	150 200	003/99	6576	D 5
Ponto de amolecimento (min.)	°C	52	46	43	37		6560	D 36
Viscosidade <i>Saybolt Furol</i>	s					004/94	14950	E 102
135 °C, min.		192	141	110	80			
150 °C, min.		90	50	43	36			
177 °C		40-150	30-150	15-60	15-60			
OU								
Viscosidade Brookfield								
135 °C, sp <sup>(b)</sup> 21, 20 rpm <sup>(a)</sup> , min.	cP	374	274	214	155		15184	D 4422
150 °C, sp <sup>(b)</sup> 21, min.	cP	203	112	97	81			
177 °C, sp <sup>(b)</sup> 21	cP	76-285	57-285	28-114	28-114			
Índice de Susceptibilidade Térmica		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)			
Ponto de Fulgor, min.	°C	235	235	235	235	149/94	11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, min.	% em massa	99,5	99,5	99,5	99,5	153/94	14855	D 2042
Ductilidade a 25 °C, min.	cm	60	60	100	100	163/98	6293	D 113
Efeito do calor e do ar (RIFOT) a 163 °C, 85 min.								D 2878
Varição em massa, máx.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5			
Ductilidade a 25 °C, min.	cm	10	20	50	50	163/98	6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8		6560	D 36
Penetração retida, min.	%	60	55	55	50	003/99	6576	D 5

Fonte: DNIT (2010).

As propriedades mais importantes dos betumes estão relacionadas com a sua aglutinação, impermeabilização, durabilidade e versatilidade de utilização. Os betumes possuem comportamento dependente do tempo de aplicação da carga e da temperatura. A durabilidade é a capacidade do material betuminoso de manter suas propriedades quando submetidos à ação do clima e carregamento, sendo caracterizada pela manutenção das suas qualidades coesivas, plásticas e pela resistência ao envelhecimento (DNIT, 2010).

Segundo Glita (1988), o CAP constitui-se de uma mistura complexa de hidrocarbonetos de massa molecular e estrutura química diferente. Em sua composição, além de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre, também podem estar presentes quantidades variáveis de ferro, níquel, cádmio, titânio, magnésio, sódio, cobalto, cobre, estanho e zinco.

Diante da complexidade de sua composição química, alguns pesquisadores elaboraram métodos de separação dos ligantes asfálticos segundo sua solubilidade em solventes específicos (GLITA, 1988).

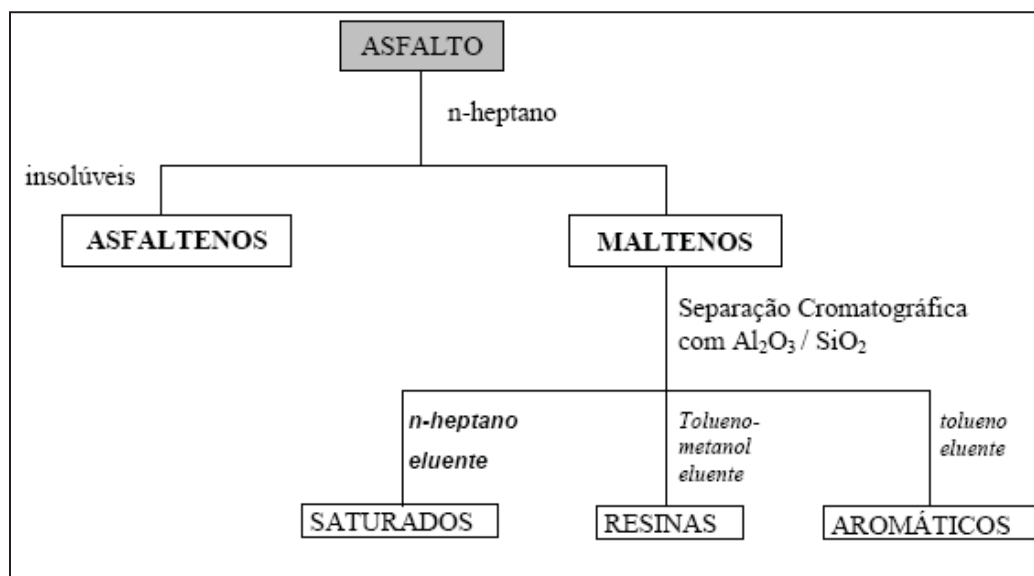


Figura 16 – Separação química do ligante asfáltico.

Fonte: Adaptado de Silva (2005).

A Figura 16 apresenta um fator importante no que diz respeito às propriedades do ligante asfáltico, sobretudo reológicas (ramo da física que estuda a viscosidade), os asfaltenos é alvo de atenção, pois sua solubilidade em diferentes solventes, até sua composição química e peso molecular, é constituída de anéis aromáticos e a variação na proporção entre as frações químicas podem originar asfaltos com diferentes composições químicas e estruturação.

A Figura 17 especifica os anéis aromáticos que são ligados ao hidrogênio ou pontes de enxofre e oxigênio, formando “pilhas” de 3 a 5 planos (ou folhas). Estas partículas se associam em partículas coloidais sob a forma de aglomerados de micelas (Figura 18), nas quais adsorvem as moléculas de asfaltenos a fim de permitir a dispersão destas no meio de óleos saturados ou óleos aromáticos, é importante que haja equilíbrio entre esse sistema, pois é importância para a previsão da estabilidade e compatibilidade com aditivos.

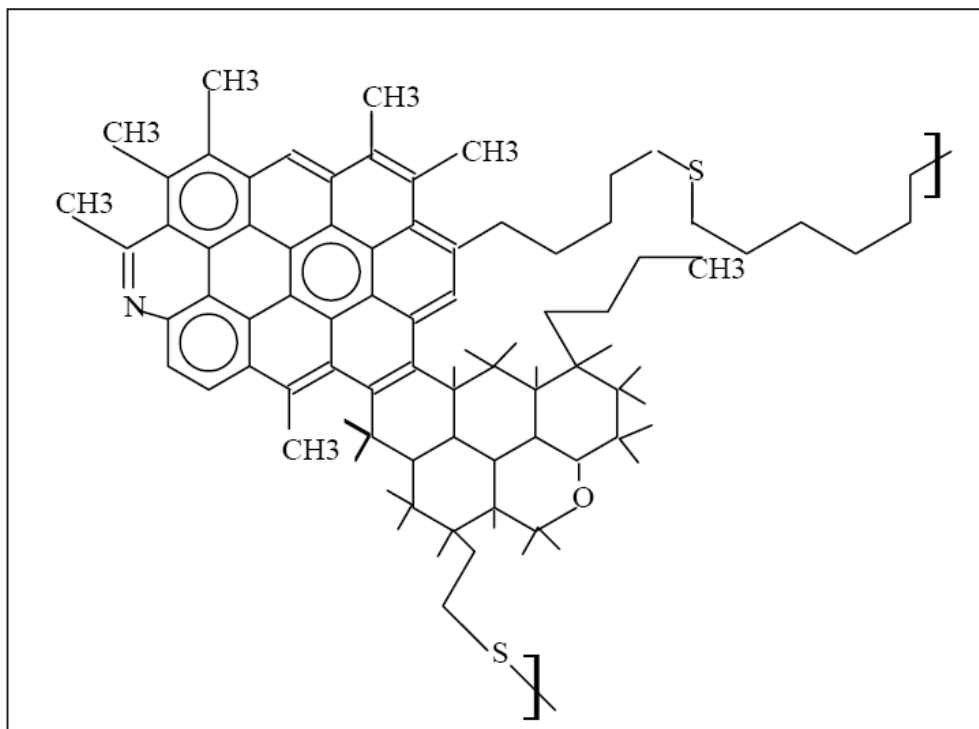


Figura 17 – Estrutura de uma molécula de Asfalteno.

Fonte: Adaptado de Silva (2005).

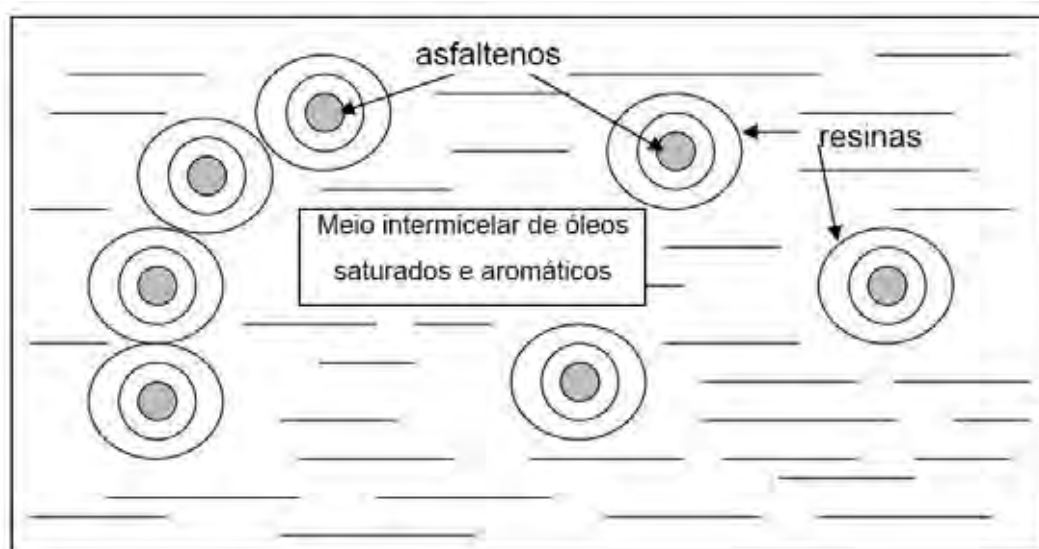


Figura 18 – Modelo de estrutura coloidal.

Fonte: Adaptado de Silva (2005).

É muito importante destacar que quanto maior for a instabilidade da fase coloidal (Figura 18), mais difícil a incorporação de um modificador, como o polímero, (SILVA, 2005).

O asfalto para pavimentação pode ser modificado com diferentes agentes, desde cargas (negro de fumo, cinza volante, cimento Portland), extensores (enxofre e lignina), oxidantes (compostos de Manganês), antioxidantes (sais de cálcio, fenóis e aminas) e polímeros (elastômeros, plastômeros e borracha de pneu moído), (WORLD ROAD, 1998).

Um ligante asfáltico é considerado modificado quando sua estrutura química ou física e suas propriedades mecânicas foram alteradas. Nesse trabalho destaca-se a modificação por polímeros elásticos também conhecidos como elastômeros. Entre os principais elastômeros utilizados como agentes modificadores de asfalto estão os copolímeros tribloco SBS (**S**tyrene **B**utadiene **S**tyrene) e borracha de pneu moído (WORLD ROAD, 1998).

### 3.2. Elastômeros

Os elastômeros, nesse caso específico os copolímeros de **S**tyrene **B**utadiene **S**tyrene (estireno butadieno estireno), originam-se de sínteses orgânicas, ou seja, pode-se ter diferentes tipos de polímeros de acordo com o tipo de síntese aplicada, e os mesmos podem-se apresentar com diferentes características (propriedades). Na Figura 19 apresenta-se alguns tipos de estruturas de copolímeros de estireno butadieno estireno.

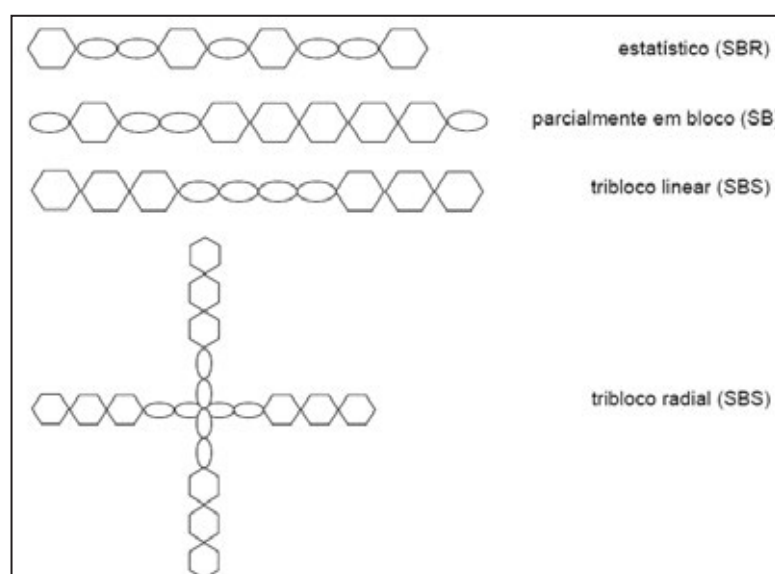


Figura 19 – Exemplos de estruturas de copolímeros de estireno.

Fonte: Adaptado de Silva (2005).

Os SBS's comerciais diferenciam-se basicamente conforme seu teor de estireno, massa molecular e estrutura (linear ou radial). Normalmente os SBS utilizados como modificador de asfalto são constituídos de 20-30% em peso de poliestireno e possuem massa molecular variando de 80.000 a 300.000 g/ml, com estrutura linear.

O SBS tem sido usado como modificador de cimentos asfálticos de petróleo (CAP's), desde 1969, com a finalidade de retardar os efeitos do envelhecimento a que estão sujeitos durante o tempo de usinagem e serviço (HUGGINS, 1992).

O polímero SBS tem sido muito empregado para modificar o asfalto, tanto para pavimentação como para aplicações industriais, apresentando comportamento melhor que asfalto convencional. O asfalto modificado com polímero SBS tem uma vida útil muito superior ao asfalto convencional, ressaltando os pavimentos drenantes, que pelos seus vazios por onde escoam a água oferece maior segurança, durabilidade, conforto, menos custos com manutenção. O SBS combina as propriedades termoplásticas e elastoméricas, sem necessidade de vulcanização e sua utilização, em larga escala nas últimas décadas, tem sido norteada de excelentes resultados, pois este sistema apresenta recuperação elástica e resistência mecânica à tração, propriedades essenciais para que o revestimento asfáltico permaneça resistente e flexível em toda gama de tensões e temperaturas a que esta sujeito (IBP, 1999).

Atualmente no Brasil, a forma mais empregada de modificação de asfalto para pavimentação é a incorporação de polímero do tipo SBS ao Asfalto: Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP 50/70, e com a realização do ensaio de Penetração entre 50 – 70 mm/10, conforme descrito na Tabela 4 (DNIT - EM 095, 2006).

Muitas vezes, para a produção do ligante asfalto (SBS), é necessária uma compatibilização entre o SBS e o CAP. Esta compatibilização pode ser realizada por meio de óleos extensores, como a fração pesada do óleo xisto, rico em maltenos e com baixo teor de asfaltenos (FAXINA, 2002).

Esses óleos são também conhecidos como agentes rejuvenescedores (AR), existem vários à disposição, como os AR 75 e AR 50, da Petrobrás. A incorporação é feita através de misturadores ou dispersores que possuem uma hélice semelhante a uma hélice naval e com rotações entre 50 e 1500 rpm. Primeiro o CAP e o óleo são adicionados e condicionados a uma temperatura de 160°C por 15 minutos, enquanto é realizada a adição do SBS, a uma rotação de 500 rpm. Em seguida, a

temperatura é elevada para no máximo 180°C e o tempo de reação ocorre entre 60 e 90 minutos a uma rotação de 1000 rpm. É necessário se ter um cuidado especial com a temperatura, pois ela não deve ultrapassar a 190°C, o que poderá ocorrer o risco de degradar o polímero empregado (IBP, 1999).

Prego (2001), mostra que no Brasil a composição mais convencional utilizada pelas pavimentadoras é: CAP 95%, Óleo 1,5% e SBS 3,5%. Essa composição atende a especificação (60/85), de acordo com o Grau (Ponto de amolecimento e Recuperação Elástica), características do cimento asfalto modificado por SBS, especificação esta, utilizada atualmente pelo Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transporte - DNIT antigo DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Os dados referentes à especificação de materiais para asfalto SBS estão apresentados, em destaque vermelho, na Tabela 5.

Tabela 5 - Características do cimento asfáltico modificado por polímero SBS (Norma DNIT 129/2010 EM).

Grau (Ponto de Amolecimento mín. / Recuperação Elástica mín.)	Unidade	55/75	60/85	65/90	Método ABNT
Ensaio na amostra original		Limite da Especificação			NBR
Penetração 25°C, 5s, 100g	0,1mm	45-70	40-70	40-70	6576
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	55	60	65	6560
Ponto de Fulgor, mín.	°C	235	235	235	11341
Viscosidade Brookfield a 135°C, spindle 21, 20 rpm, máx.	cP	3000	3000	3000	15184
Viscosidade Brookfield a 150°C, spindle 21, 50 rpm, máx.	cP	2000	2000	2000	15184
Viscosidade Brookfield a 177°C, spindle 21, 100 rpm, máx.	cP	1000	1000	1000	15184
Ensaio de Separação de Fase, máx.	°C	5	5	5	15166
Recuperação Elástica a 25°C, 20 cm, mín.	%	75	85	90	15086
<b>Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 min.</b>					
Variação de massa, máx., (1) (2)	%	1	1	1	15235
Aumento do PA, máx. (2)	°C	7	7	7	6560
Redução do PA, máx. (2)	°C	5	5	5	6560
Porcentagem de Penetração Original, mín. (2)	%	60	60	60	6576
Porcentagem de Recuperação Elástica Original a 25°C, mín. (2)	%	80	80	80	15086

Fonte: DNIT (2010).

Na tabela 5 a coluna vermelha apresenta a descrição das características e das exigências mínimas/máximas necessárias que serão utilizadas nesse trabalho.

### 3.3. Borracha pneu moído

A borracha utilizada no ligante asfalto-borracha pode ser proveniente de pneus de automóveis ou caminhões. Geralmente, pneus de automóveis são compostos por cerca de 16 a 20% de borracha natural e de 26 a 31% de borracha sintética, enquanto pneus de caminhões são compostos por cerca de 31 a 33% de borracha natural e de 16 a 21% de borracha sintética. Por exemplo, um pneu de veículo de automóvel típico, com peso aproximado de 10,5 kg, apresenta, em relação ao peso total do pneu, 27% de borracha sintética, 20% de borracha natural, 25% de negro-de-fumo, 14% de produtos químicos (óleos, pigmentos), 10% de aço e 4% de poliéster e náilon (BRIDGESTONE, 2010).

Os fatores relacionados à borracha que são considerados para produção do asfalto são:

#### a) Tipo de borracha

A borracha utilizada neste trabalho foi fornecida por uma empresa do interior do estado de São Paulo, cujo processo mistura borracha de pneus de automóveis e caminhões e tem como característica básica de recuperar as borrachas vulcanizadas, a baixas temperaturas (máximo de 80°C). O processamento, dessa forma, ocorre na fase líquida, através de um catalisador heterogêneo, sendo a separação da borracha e do aço é feita por filtragem e magnetismo. O produto gerado (borracha em pó) apresenta alta homogeneidade e mantêm muitas das propriedades físicas da composição original.

#### b) Tamanho das partículas de borracha

A granulometria da borracha pode variar com o processo de produção, principalmente em função dos equipamentos e da temperatura de moagem (Heiztman, 1992). A borracha utilizada neste trabalho é composta de partículas que passam na peneira de malha 40 (# 40), de (0,42 mm) e ficam retidas na peneira malha 100 (#100), de (0,150 mm), denominada neste trabalho de #40.

#### c) Teor de borracha

A Standard Specification for Asphalt Rubber Binder, Norma ASTM D-6114-97, norteia os pontos básicos da modificação do ligante por via úmida. O asfalto convencional (CAP 50/70) poderá ser modificado pela adição de 15 a 20% de borracha moída #40.

A adição da borracha ao betume resulta num betume modificado com propriedades e características diferentes do betume que lhe deu origem. Esta interação é influenciada por diversas variáveis, ou seja, reação é influenciada pela temperatura, pelo tempo de digestão, quantidade e tipo de borracha empregada na mistura (BAKER et al., 2003).

O asfalto com borracha de pneu moído é introduzido em uma mistura betuminosa através de dois processos, o úmido e o seco. Segundo Kuennen (2005), no processo úmido, o betume e a borracha são misturados a elevadas temperaturas durante um determinado período de tempo denominado tempo de digestão antes de ser adicionado aos agregados; enquanto que no processo seco, a borracha desempenha a função de agregado e é adicionada antes da incorporação do ligante aos agregados.

As principais diferenças entre os dois processos incluem o tamanho da partícula da borracha (no processo seco, a partícula pode ser mais grossa) abaixo de 40 MESH; a quantidade de borracha (o processo seco utiliza mais borracha); a função da borracha (no processo úmido a borracha atua com o betume, ou seja, ocorre uma interação, enquanto que no seco com o agregado); e a facilidade de incorporação na mistura betuminosa (o processo seco não requer equipamento específico e o processo úmido necessita da instalação de tanques misturadores e bombas especiais) (ROBERTS et al., 1989).

### **Processo seco**

No processo seco a borracha é utilizada como agregado fino em misturas betuminosas. Neste processo a borracha (normalmente 1% a 3% por massa do agregado total na mistura) é incorporada na mistura antes do betume seja introduzido. O processo seco é utilizado somente para produção de misturas betuminosas a quente (HEITZMAN, 1992).

Visser e Verhaeghe (2000) afirmam que no processo seco não ocorre a fusão do betume com a borracha incorporada. Takallou e Takallou (2003) asseguram que nesse processo não ocorre uma reação entre os materiais (betume e borracha), de modo que a borracha tem função de aditivo e não de um agente modificador.

Os resultados de investigações conduzidas no estado de Illinois (Estados Unidos) revelaram que os trechos experimentais com misturas betuminosas utilizando o processo seco apresentaram desempenho inferior aos trechos onde foram aplicadas misturas betuminosas convencionais (VOLLE, 2000).

### **Processo úmido**

O processo úmido consiste na incorporação da borracha de pneus moída com o betume antes da mistura do betume com o agregado (pedras). O resultado é um betume modificado que tem propriedades significativamente diferentes do betume original. A mistura do betume com a borracha reage e forma um composto chamado asfalto-borracha (*asphalt rubber*), diferente do asfalto original (ODA, 2000). Quando a borracha de pneus é previamente adicionada ao asfalto convencional, ela modifica-o permanentemente. Neste processo ocorre a transferência efetiva dos polímeros e dos componentes químicos dos pneus para o asfalto que se traduzem em maior elasticidade e resistência ao envelhecimento (MORILHA e GRECA, 2003).

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.

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 asfalto (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 asfaltenos, alterando as propriedades reológicas e de coesão do asfalto residual (SINGLETON et al, 2000).

A Figura 20 mostra de forma resumida o processo de modificação, ou seja:

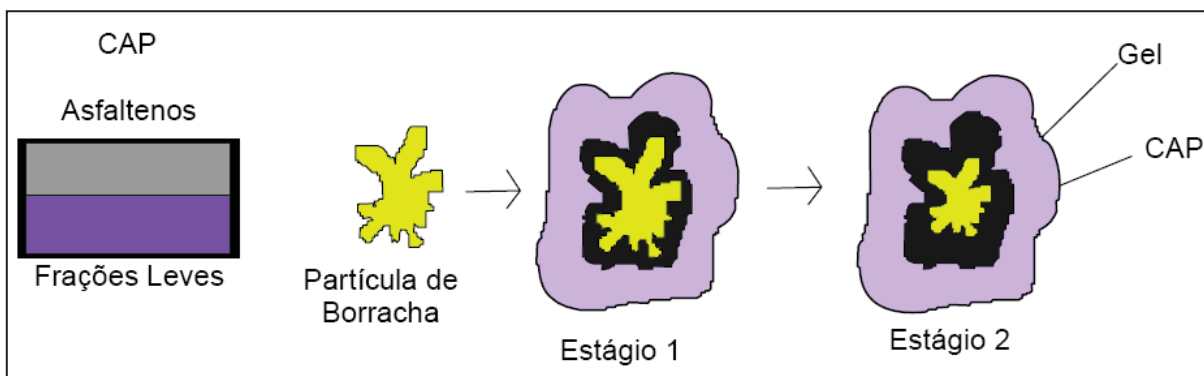


Figura 20 – Processo resumido modificação asfalto borracha.

Fonte: Adaptado de Silva (2008).

A reação envolve a absorção de óleos aromáticos do asfalto nas cadeias de polímeros que incluem os principais componentes estruturais da borracha (TFHRC, 2005).

Conforme já mencionado o processo de reação entre as partículas de borracha e o asfalto é dependente da temperatura empregada. As temperaturas mais elevadas promovem uma reação mais rápida e podem resultar em um maior inchamento da borracha no asfalto. Segundo Hicks e EPPS (2000), as temperaturas típicas para produção de asfalto-borracha variam entre 160 °C a 205 °C.

Outro ponto muito importante é a intensidade da agitação entre o asfalto e a borracha durante o tempo de digestão pode influenciar as propriedades do asfalto-borracha. Essa intensidade pode variar entre baixa velocidade de agitação, em que lentamente mantém as partículas de borracha em suspensão, e elevada velocidade de agitação, a qual pode levar à quebra (mecânica) das partículas de borracha. Com baixa velocidade de agitação, os componentes do asfalto são simplesmente absorvidos com inchamento das partículas de borracha, ocorrendo pouca dispersão do polímero (borracha) no asfalto. No entanto, com elevada velocidade de agitação, as partículas de borracha incham e amolecem devido à absorção do asfalto, podendo ocorrer uma dispersão da borracha no asfalto.

Abdeirahman (2006) descreve o processo com os grãos de borracha durante a fabricação do asfalto-borracha ao longo do tempo, e apresentado na Figura 21.

O processo é descrito de acordo em três fases: (i) fase I – inchamento da borracha durante o tempo de digestão e temperatura determinada, formando o betume-borracha; (ii) fase II – início da despolimerização e da redução da viscosidade; (iii) fase III – despolimerização com queda da viscosidade.

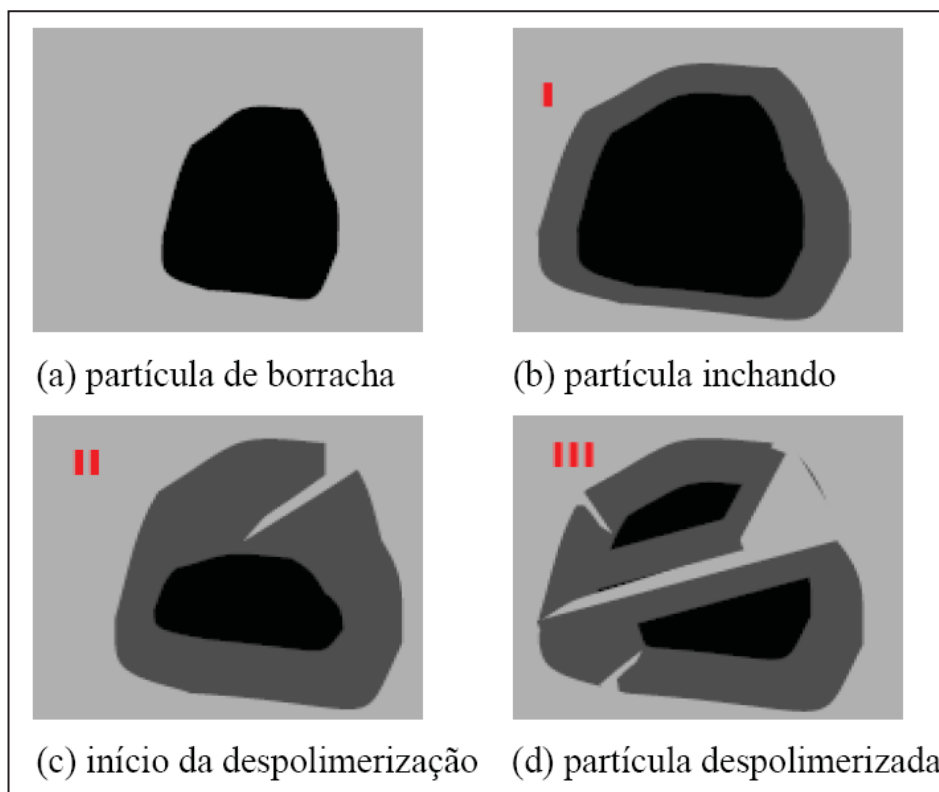


Figura 21 – Grão de borracha durante o processo de fabricação.

Fonte: Adptado de Abdeirahman (2006).

Outro fator importante está relacionado com as propriedades químicas do betume base que podem influenciar a reação com a borracha, asfaltos com poucos componentes (aromáticos) absorvidos pela borracha tendem a produzir asfaltos-borracha com baixas viscosidades e pouca modificação das propriedades.

Considerando que a borracha de pneus usados é uma mistura homogênea de polímeros e de borracha, a compatibilidade é mais dependente das propriedades do asfalto e menos dependente da composição da borracha. A composição química do asfalto varia dependendo da origem do petróleo bruto. Se o asfalto possui um nível baixo de aromáticos, desenvolve-se problemas de compatibilidade porque há pouca quantidade de aromáticos que foram absorvidos pela borracha (HICKS e EPPS, 2000).

Segundo Way (2000), nos últimos 20 anos, o Departamento de Transporte do Arizona (USA), verificou que as misturas de asfalto-borracha, para seus materiais e clima, são ótimos e duráveis revestimentos. Sendo observado:

- Uma redução significativa na reflexão de trincas, mesmo nas estradas com tráfego pesado e intenso;
- Uma 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.

De acordo com Morilha e Trichês (2003) a utilização de betume-borracha reduz o fenômeno do envelhecimento do betume durante a produção da mistura, considerando os seguintes aspectos:

- A espessura da película sobre o agregado em misturas com asfalto-borracha é superior àquela encontrada com betumes convencionais devido à sua elevada viscosidade, propiciando um envelhecimento menos acelerado durante a produção da mistura na central;
- A recuperação elástica do betume após a simulação de envelhecimento no ensaio RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*), apontam uma melhoria desta característica ao invés de perda que ocorre com os demais ligantes convencionais e modificados por outros polímeros, devido à interação entre as moléculas pela fusão propiciada pelo ensaio.

Por fim, pode-se mencionar que o betume-borracha melhora as características de adesividade do agregado ao betume em relação ao betume convencional devido a um aumento da espessura que recobre o agregado tendo em conta que possui uma viscosidade maior e também uma percentagem de betume mais elevada (RPA, 2006).

## 4. Materiais e Métodos

Neste capítulo serão realizados os ensaios laboratoriais, que deu origem a análise comparativa entre o asfalto modificado com Styrene-Butadiene-Styrene - SBS e o asfalto modificado com borracha de pneu moído, considerando como parâmetro a especificação de asfalto modificado com SBS (especificação utilizada atualmente pelo Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transporte - DNIT antigo DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNIT 129/2010 EM).

Todos os ensaios foram realizados no laboratório de uma empresa do interior do estado de São Paulo – Brasil; empresa essa, especializada no segmento de asfaltos, e que segue as normas pertinentes que serão descritas a seguir.

### 4.1. Materiais

Os materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho foram:

- Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O CAP utilizado para esse estudo é o CAP 50/70, originário da refinaria de Paulínia, interior do estado de São Paulo, fabricado pela empresa Petrobrás.

- Borracha Pneu Moído

A borracha moída que será utilizada nesse trabalho é a Borracha malha 40 MESH que é oriunda de uma empresa do interior do estado de São Paulo.

- Óleo Extensor

O Óleo extensor que será utilizado nesse trabalho é um Óleo Neutro Pesado que é oriundo de uma empresa do interior do estado de São Paulo.

- Polímero Styrene-Butadiene-Styrene - SBS

O Polímero utilizado nesse trabalho é um SBS linear com nome comercial Kraton 1101-BT, que é oriundo de uma empresa do interior do estado de São Paulo.

## 4.2. Métodos

O presente trabalho faz uma análise comparativa utilizando dados laboratoriais referentes às características do asfalto borracha, comparando-os com os dados do asfalto modificado convencional. Para essa análise comparativa, foram analisadas em laboratório, uma amostra do asfalto modificado com SBS que atende a especificação atual do DNIT e três amostras do asfalto modificado com borracha de pneu moído usando o processo úmido em diferentes porcentagens das composições variando-se o teor de CAP, Óleo e Borracha de pneu moído.

A abordagem metodológica, será apresentada em 4 etapas:

Para todas as amostras serão utilizadas os mesmos materiais (Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP, Borracha Pneu Moído e Óleo).

A Standard Specification for Asphalt Rubber Binder, Norma ASTM D-6114-97, norteia os pontos básicos da modificação do ligante por via úmida. O asfalto convencional (CAP 50/70) poderá ser modificado pela adição de 15 a 20% de borracha moída # 40, já a composição 1 do asfalto modificado com polímeros é a mais comumente utilizada conforme Prego (2000); e as composições 2, 3 e 4 conforme indicações das Normas ASTM D-6114-97 e DNIT 111/2009 – EM, que determina um teor mínimo de borracha de 15%. Segundo Greca 2010, o ligante asfáltico EcoflexB® utiliza em sua composição 15% de teor de borracha, portanto para esse trabalho limitou-se este e valor e tomou-se como base esses parâmetros, onde submeteu-se a mistura do asfalto borracha a ensaios empíricos descritos a seguir.

**1ª Etapa:** Para este comparativo produziu-se, em laboratório, três amostras de asfalto modificado com SBS, denominada de **Composição 1**, que atenda a especificação atual asfalto modificado com SBS.

As composições das diferentes formulações estão descritas na Tabela 6:

Tabela 6 – Composição das formulações.

Materiais	Composição 1	Composição 2	Composição 3	Composição 4
	Convencional SBS (% massa)	(% massa)	(% massa)	(% massa)
CAP 50/70	95,0	70,0	64,0	60,0
SBS	3,5	-	-	-
Óleo Extensor	1,5	15,0	18,0	20,0
Borracha de Pneu	-	15,0	18,0	20,0
Moído				

A produção das amostras do asfalto SBS, utilizou um agitador mecânico com controle digital de rotação entre 50 e 2400 rpm, com uma hélice para dispersão de polímeros (hélice tipo naval 80mm de diâmetro), e capacidade de agitação de até 60 litros de água. Para o controle de temperatura foi usado um termômetro ASTM 17 C com precisão de  $\pm 1^\circ\text{C}$  devidamente calibrado.

As fases que constituíram a produção das três amostras do asfalto SBS foram:

Fase 1 - Colocação de um recipiente (lata metálica com capacidade de 3,6l), com o asfalto (CAP 50/70), e Óleo Extensor na chapa aquecedora com controle de temperatura digital e manutenção de uma temperatura de  $160^\circ\text{C}$  por 5 minutos, enquanto foi adicionado o SBS a uma rotação de 500 rpm;

Fase 2 - Elevação da temperatura para  $180^\circ\text{C}$  com um tempo de reação (dispersão) de 55 minutos a uma rotação de 1000 rpm. Este procedimento teve como referencial o utilizado por (Oda, 2000).

**2ª Etapa:** Desenvolver em laboratório três amostras do asfalto modificado com borracha de pneu moído em diferentes composições denominadas de **Composição 2, 3 e 4** conforme Tabela 6, variando - se o teor de CAP, Óleo e Borracha de pneu moído, para cada composição produziu-se 3 replicas.

Para produção da amostra do asfalto borracha, se utilizou um agitador mecânico com controle digital de rotação entre 50 e 2400 rpm, com uma hélice para dispersão de polímeros (hélice tipo naval 80mm de diâmetro), e capacidade de agitação de até 60 litros de água. Para o controle de temperatura foi usado um termômetro ASTM17C, com precisão de  $\pm 1^\circ\text{C}$  devidamente calibrado.

Fase 1 - Colocação de um recipiente (lata metálica com capacidade de 3,6l), com o asfalto (CAP 50/70), e Óleo Extensor na chapa aquecedora com controle de temperatura digital e manutenção de uma temperatura de 160°C por 5 minutos, enquanto era feita a adição da Borracha moída em uma rotação de 500 rpm;

Fase 2 - Elevação da temperatura para 190°C com um tempo de reação (dispersão) de 55 minutos a uma rotação de 1000 rpm. Este procedimento teve como referencial o utilizado por (Oda, 2000).

**3ª Etapa:** Realizar as análises necessárias de acordo com a norma (DNIT 129/2010 EM) nas amostras desenvolvidas;

As análises realizadas e suas respectivas normas metodológicas estão descritas a seguir (penetração, ponto de amolecimento e fulgor, viscosidade, recuperação elástica).

#### **4.2.1. Ensaio para determinação da penetração: Norma ABNT NBR 6576:2007**

##### **- Definição do ensaio de penetração**

A penetração é definida como a distância em décimos de milímetros que uma agulha padronizada penetra verticalmente na amostra de material sob condições prefixadas de carga, tempo e temperatura.

A amostra é fundida, colocada no recipiente apropriado, resfriada inicialmente a temperatura ambiente e, na sequência, em banho de água com temperatura controlada. Após tempo determinado, a amostra é submetida à penetração por agulha padronizada em aparelho adequado denominado penetrômetro.

##### **- Materiais empregados no ensaio de penetração**

Os materiais empregados para a realização dos ensaios estão descritos abaixo:

*- Recipiente*

O recipiente na qual é produzida a amostra a ser ensaiada deve ser de metal, cilíndrico e de fundo plano, com dimensões internas de 55 x 35 mm.

*- Penetrômetro*

Aparelho que permite o movimento da haste que suporta a agulha, sem fricção. A calibração deve ser cuidadosa para fornecer resultados de acordo com a definição de penetração.

A massa da haste deve ser de  $(47,50 \pm 0,05)$  g e a massa da haste mais agulha deve ser de  $(50,00 \pm 0,05)$ g. Massas de  $(50,00 \pm 0,05)$  g e  $(100,00 \pm 0,05)$  g devem estar disponíveis para compor massas totais de 100 g e 200 g, requeridas em condições opcionais de ensaio, conforme Figuras 22 e 23 (foto penetrômetro).



Figura 22 – Vista do penetrômetro completo (haste, agulha, controlador – temporizador).



Figura 23 – Recipiente qual amostra será ensaiada e agulha de penetração.

*- Agulha*

A agulha deve ser de aço inoxidável tipo AISI -C ou equivalente, temperado, com dureza HRC 54 a HRC 60, altamente polida no seu acabamento final, conforme mostra a Figura 23 (foto recipiente “anel” e da agulha de penetração).

*- Banho d'água*

O banho para conter o recipiente com a amostra deve ter capacidade mínima de 10 litros tendo uma prateleira perfurada situada pelo menos a 50 mm do fundo, Figuras 24 e 25, devendo a lâmina de água sobre a amostra não ter menos de 100 mm e ser capaz de manter a temperatura de ensaio com exatidão de  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ . O uso de água destilada é recomendado, para evitar sua contaminação por agentes surfactantes ou dispersantes de outros produtos químicos, pois sua presença pode afetar os valores obtidos.



Figura 24 – Vista parcial do equipamento para condicionamento da amostra.



Figura 25 - Amostra condicionada no interior do banho, imersa na água.

#### - *Dispositivos para medida de tempo*

Deve-se usar cronômetro graduado em 0,1 segundo ou com intervalos de 60 segundos.

#### - *Termômetros*

Deve-se utilizar três termômetros, de imersão total, do tipo ASTM D 17C.

#### - **Descrição do ensaio de penetração**

A amostra deve estar fundida, elevar a temperatura do material em no máximo  $90^{\circ}\text{C}$  acima do seu ponto de amolecimento para asfalto conforme ABNT NBR 6560:2008. O aquecimento, com agitação constante, deve durar um tempo

mínimo necessário para garantir que a amostra esteja fluida e homogênea. Deve-se evitar a inclusão de bolhas de ar. A seguir, deve-se transferir a amostra para o molde cilíndrico do aparelho de penetração de modo a ter uma altura de material, após o resfriamento, na temperatura de ensaio, em no mínimo 120% de profundidade da penetração esperada. Quando variarem as condições de ensaio, preparar uma amostra para cada variação.

Se o recipiente tiver um diâmetro menor que 65 mm e a penetração esperada for maior que 200 mm, deve-se preparar três amostras distintas para cada ensaio.

Inicialmente, examina-se o suporte da agulha e a haste, para verificar a ausência de água e outros materiais estranhos. A agulha deve ter sido limpa com solvente, seca com pano limpo e fixada no suporte. Usando um indicador de nível, certificar-se de que o equipamento está nivelado.

A menos que sejam especificadas condições especiais, colocar o peso de 50g acima da agulha, fazendo com que a carga total seja de 100g para o conjunto de penetração, inclusive a agulha. O recipiente da amostra deve ser inserido no interior da cuba de transferência, e esta preenchida com água, de tal modo que a amostra fique totalmente submersa. Coloca-se a cuba de transferência sobre o prato do penetrômetro para início imediato do ensaio. Deve-se ajustar a agulha na superfície da amostra, fazendo com que coincida exatamente a imagem da agulha refletida pela amostra com a sua imagem verdadeira. A imagem refletida deve ser obtida usando-se de uma fonte de luz que ilumine adequadamente a amostra.

Inicia-se então a leitura do mostrador do penetrômetro.

Após o ajuste da agulha a superfície da amostra e da leitura do mostrador, deve-se liberar rapidamente a agulha durante o tempo especificado e ajustar o instrumento para medir a distância penetrada anotando os valores.

Deve-se fazer pelo menos três determinações em pontos da superfície da amostra, distantes entre si e da borda do recipiente em 10 mm no mínimo. Depois de cada penetração, retira-se a cuba de transferência e o recipiente da amostra, e recoloca-a no banho a temperatura especificada. Limpa-se a agulha com solvente apropriado, enxuga-se com um pano limpo e seco e repete-se a operação já descrita. Para valores de penetrações maiores que 200 mm, utiliza-se no mínimo

três agulhas, deixando-as na amostra até completar as determinações. Anota-se a média obtida das 3 penetrações até a unidade.

#### **4.2.2. Ensaio para determinação do ponto de amolecimento (anel e bola): Norma ABNT NBR 6560:2008**

##### **- Definição do ensaio de ponto de amolecimento**

O ponto de amolecimento é definido como a temperatura lida, em graus Celsius, no momento em que cada uma das esferas padronizadas, após terem atravessado um anel, também padronizado (contendo o material betuminoso), percorre uma distância de 25,4 mm, sob condições especificadas, e tocam a placa de referência do suporte de anéis e termômetro.

##### **- Materiais empregados no ensaio de ponto de amolecimento**

Os materiais empregados na realização dos ensaios estão descritos abaixo:

A aparelhagem necessária a execução do ensaio estão mostrados na Figura 26.



Figura 26 – Vista do conjunto em aquecimento.

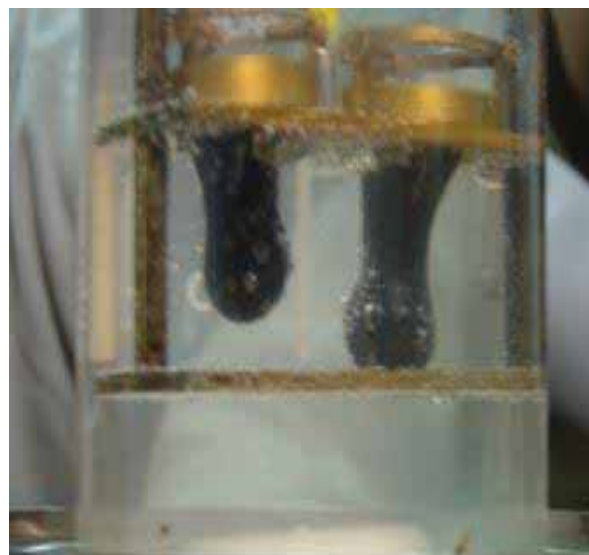


Figura 27 – Registro do momento em que uma das esferas toca a placa de referência.

- *Anéis*

De acordo com a Figura 28. Os anéis devem ser mantidos no suporte na posição horizontal, de tal modo que a parte inferior deles fique a 25,4mm da parte superior da placa de referência, e esta, de 13 mm a 19 mm acima do fundo do béquer.

*- Esferas*

De aço, com 9,50 mm de diâmetro e  $(3,50 \pm 0,05)$ g.

*- Recipiente*

Béquer de vidro, de borossilicato e fôrma baixa, com capacidade de 800ml e aproximadamente 85mm de diâmetro e 120mm de altura.

*- Suporte para anéis e termômetro*

Este suporte é fabricado de latão, de acordo com a descrição apresentada Figura 28.

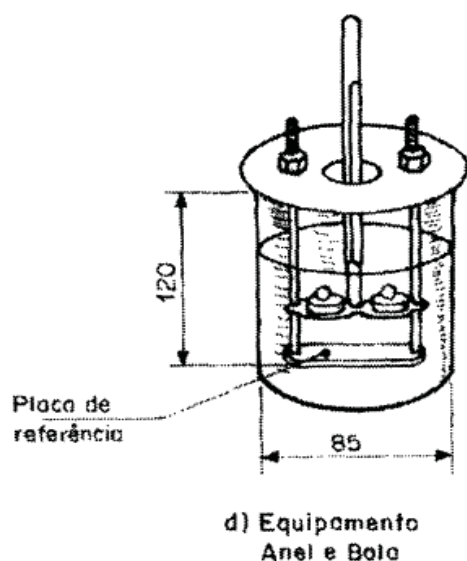


Figura 28 – Vista esquemática do equipamento para realização ensaio.



Figura 29 - Vista de parte dos equipamentos utilizados na realização do ensaio.

*- Termômetros*

Deve-se utilizar termômetro, de imersão total, do tipo ASTM 113C.

*- Dispositivos para medida de tempo*

Deve-se usar cronômetro graduado em 0,1 segundo ou com intervalos de 60 segundos.

*- Fonte de aquecimento*

Pode-se utilizar um queimador de gás (Bico de Bunsen) ou um aquecedor elétrico com transformador variável que permita manter a velocidade de aquecimento especificada (a temperatura deve aumentar 5°C por minuto).

*- Dispositivos para medida de tempo*

Deve-se utilizar cronômetro graduado em 0,1 segundo ou com intervalos de 60 segundos.

**- Descrição do ensaio de ponto de amolecimento**

Retirar uma amostra representativa do material a ensaiar. Se a amostra não estiver fluida, aquecê-la em um recipiente com tampa, até que se funda totalmente. Em seguida, com agitação constante, moderada, para evitar a inclusão de bolhas e o super aquecimento localizado. Deve-se elevar a temperatura da amostra até o limite máximo 90°C acima do ponto de amolecimento esperado para os ligantes asfálticos. O tempo de aquecimento da amostra deve garantir a sua fluidez e homogeneidade, porém não deve-se ultrapassar a 30 minutos.

A amostra moldada em anéis padronizados é resfriada inicialmente a temperatura ambiente e, na sequência, em banho de água ou glicerina com temperatura controlada de 5°C  $\pm$  1°C, estando os anéis suspensos pelo suporte de anéis e termômetro. Após o tempo de resfriamento, as esferas são colocadas sobre a superfície da amostra e mantidas pelas guias. Em seguida, o conjunto é levado ao aquecimento numa taxa constante, deve-se aquecer o fluido do banho a velocidade de 5°C por minuto. Se, após 3 minutos, não conseguir ajustar a taxa de aquecimento especificado, deve-se abandonar o ensaio.

O aquecimento que promove o amolecimento da amostra que cede ao peso das esferas, sendo lidas as temperaturas no instante em que cada esfera toca a placa de referência do suporte de anéis e termômetro.

O tempo máximo entre o enchimento dos anéis e o final do ensaio não deve exceder 240 minutos. Se a diferença entre os valores obtidos nas determinações em duplicata exceder 1°C, repetir o ensaio.

#### **4.2.3. Ensaio para determinação do ponto de fulgor: Norma ABNT NBR 11341:2008**

##### **- Definição do ensaio do ponto de fulgor**

De acordo com a ABNT NBR 11341:2008 ponto de fulgor é dado pela menor temperatura, na qual a aplicação de uma chama de ensaio causa a ignição dos vapores da alíquota sob as condições específicas do ensaio. Considera-se que houve ignição (fulgor) do material quando uma chama aparece e se propaga sobre a totalidade da superfície da alíquota e instantaneamente se extingue.

Utiliza-se o ponto de fulgor em regulamentos de expedição (transporte) e segurança para definir materiais inflamáveis e combustíveis, pois indica a possível presença de materiais altamente inflamáveis e voláteis num material relativamente não inflamável ou não volátil. Por exemplo, um ponto de fulgor baixo em uma amostra de óleo de motor, pode ser indicativo de contaminação por gasolina.

##### **- Materiais empregados no ensaio do ponto de fulgor**

Os materiais empregados na realização dos ensaios estão descritos abaixo:

###### *- Aparelho de vaso aberto Cleveland (automático)*

Equipamento automático para determinação do ponto de fulgor que deve executar o ensaio, o equipamento deve utilizar a cuba de ensaio, conforme mostra as Figuras 30 e 31, com os equipamento e a cuba.

Estes dispositivos devem apresentar indicações de temperatura compatíveis com as dos termômetros de mercúrio.

###### *- Fonte de ignição*

É a chama de gás natural (metano) ou gás engarrafado (propano e butano), são consideradas aceitáveis para uso como fontes de ignição.

###### *- Termômetros*

Deve-se utilizar termômetro, de imersão total, do tipo ASTM 3C.



Figura 30 – Vista parcial do equipamento automático para realização ensaio de ponto de fulgor.



Figura 31 – Vista da cuba para realização ensaio de ponto de fulgor.

### - Descrição do ensaio de ponto de fulgor

Adiciona-se aproximadamente 70 ml de amostra a cuba de ensaio. A temperatura da amostra é aumentada, rapidamente no início, e depois a uma taxa mais lenta e constante, quando o ponto de fulgor estiver próximo.

Em intervalos de temperatura especificados, a chama de ensaio é passada sobre a cuba. O ponto de fulgor é a menor temperatura do líquido na qual a aplicação da chama de ensaio causa a ignição dos vapores da amostra que se encontram acima da superfície.

Coloca-se o aparelho manual ou automático numa superfície nivelada. Os ensaios devem ser realizados em ambiente ou compartimento livre de corrente de ar. Ensaios feitos onde exista corrente de ar não são confiáveis. O aparelho com uma proteção numa capela, cuja tiragem seja controlada de modo que os vapores possam ser removidos sem causar correntes de ar sobre a cuba de ensaio durante os últimos 56° C de aumento na temperatura até o ponto de fulgor.

Lava-se a cuba de ensaio com um solvente apropriado para remover qualquer óleo ou traço de goma ou resíduo remanescente de um ensaio anterior. Se os depósitos de carbono estiverem presentes, eles devem ser removidos com palha de aço. Lava-se a cuba com água fria e secar por alguns minutos sobre uma chama

acesa, placa aquecida ou ar comprimido seco e filtrado para remover os últimos traços.

O dispositivo de medição deve ser mantido na posição vertical com o bulbo posicionado no fundo da parte interna da cuba e localizada num ponto médio entre o centro e o lado da cuba, num diâmetro perpendicular ao arco (ou linha) da extensão da chama de ensaio e do lado oposto a haste do queimador da chama de ensaio.

O aparelho automático deve ser capaz de controlar da taxa de aquecimento, aplicação da chama de ensaio, detecção e registro do ponto de fulgor.

Deve-se encher a cuba de ensaio com amostra de maneira que o topo do menisco esteja exatamente na linha de enchimento e posicioná-la no centro do aquecedor. As temperaturas da cuba e da amostra não devem exceder 56°C abaixo do ponto de fulgor esperado. Se for adicionada quantidade de amostra em excesso na cuba, deve-se remover o excesso usando uma seringa ou dispositivo similar. Entretanto, se houver amostra do lado de fora da cuba de ensaio, esvaziar, limpar e reencher-la. Desfazer ou remover qualquer espuma ou bolha de ar na superfície do líquido com uma espátula ou outro dispositivo adequado, mantendo o nível requerido de amostra.

O Material sólido não deve ser transferido para a outra cuba de ensaio. As amostras sólidas ou viscosas devem ser aquecidas até que estejam fluidas antes de serem vertidas na cuba. A temperatura da amostra durante o aquecimento não deve exceder 56°C, abaixo do ponto de fulgor esperado.

Acende-se a chama após a temperatura ter se elevado 5°C do início e continua-se a verificação a cada 2°C, e ajusta-se seu diâmetro para 3,2 mm a 4,8 mm.

As temperaturas devem ser anotadas em graus Celsius (°C), que houve ignição (fulgor) do material quando uma chama aparece e se propaga sobre a totalidade da superfície da amostra e instantaneamente se extingue.

#### 4.2.4. Ensaio para determinação da viscosidade Brookfield: Norma ABNT NBR 15184:2004

##### - Definição do ensaio da viscosidade Brookfield

Esta Norma descreve o procedimento para determinação da viscosidade aparente do asfalto de 38°C a 260°C, usando um viscosímetro rotacional, como, por exemplo, Brookfield Thermocel, entre outros, conforme mostra a Figura 32.



Figura 32 – Vista do viscosímetro brookfield modelo RV.

Algumas definições utilizadas nesse experimento devem ser apresentadas, ou seja:

- *Viscosidade aparente* é definida como a razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento para líquidos newtonianos e não-newtonianos.

- *Fluído newtoniano* é o Fluido cuja taxa de cisalhamento é proporcional à tensão de cisalhamento.

- *Asfalto* é o termo utilizado para ligante asfáltico (Cimento asfáltico de petróleo e asfaltos modificados).

- *Taxa de cisalhamento* é a medida da variação da deformação com o tempo (em segundo).

- *Tensão de cisalhamento* é a força por unidade de área necessária para produzir uma ação cisalhante.

- *Viscosidade* é a razão entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de cisalhamento do fluido.

- *Haste (spindle)* é o Dispositivo que é imerso na amostra e cujas dimensões empregadas, juntamente com a resistência ao torque rotacional, determinam a viscosidade aparente.



Figura 33 – Modelo de haste e spindle.

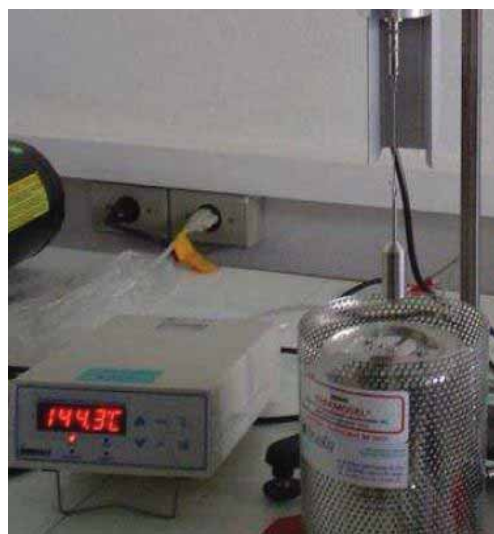


Figura 34 – Recipiente termostático (câmara de amostra), dispositivo de medição de temperatura com detalhe do RT.

### - **Materiais empregados na viscosidade Brookfield**

#### - *Viscosímetro rotacional (Figura 32)*

Equipamento capaz de determinar o torque necessário para girar a haste (Figura 33), a uma velocidade constante, enquanto está imerso na amostra à temperatura de ensaio, e expressá-lo em viscosidade.

#### - *Haste (Figura 33)*

Pode-se apresentar formas e tamanhos variados para a determinação da viscosidade em amostras de asfalto.

- *Recipiente térmico (Figura 34)*

Com temperatura controlada – Manter a amostra de asfalto à temperatura constante.

- *Câmara de amostra*

Reutilizável ou descartável.

- *Dispositivo de medição de temperatura (Figura 34)*

Capaz de manter a temperatura da amostra entre (38 e 260)°C, com resolução de  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

**- Descrição do ensaio de viscosidade Brookfield**

O viscosímetro rotacional, conforme descrito neste método é usado para medir a viscosidade de asfalto a altas temperaturas. O torque aplicado em uma haste imersa (Figura 33), em uma pequena amostra de asfalto contida em um recipiente termostaticamente controlado (Figura 34), é a medida da resistência relativa à rotação. O torque e a velocidade são usados para determinar a viscosidade de asfalto em centipoise.

O viscosímetro rotacional e o aquecedor da câmara térmica deve ser nivelado.

O viscosímetro deve ser zerado antes do uso. Liga-se o equipamento pelo menos 5 minutos antes de iniciar o ensaio.

Ajusta-se a temperatura desejada para o ensaio no controlador de temperatura. Seleciona-se a haste que irá desenvolver o torque entre 10% e 98% da capacidade do instrumento à velocidade selecionada. As determinações terão maior exatidão quanto maior o valor do torque.

Deve-se pré-aquecer a câmara da amostra e a haste selecionada e aguardar pelo menos 15 minutos até estabilizar.

Adiciona-se o volume de amostra, previamente homogeneizada, de acordo com a especificação da haste empregada.

Insera-se a haste selecionada na amostra e acoplar a câmara da amostra ao viscosímetro. Alinha-se o controlador de temperatura seguindo as instruções do manual do fabricante.

Aguarda--ser até 30 minutos para que a amostra de asfalto atinja a temperatura desejada e pelo menos 10 min. para atingir o equilíbrio, antes de iniciar o ensaio.

Inicia-se a rotação do motor do viscosímetro a uma velocidade tal que desenvolva um torque entre 10% e 98% da capacidade da escala do instrumento.

Manter a velocidade e a amostra em equilíbrio por 5 minutos e observar a temperatura de forma que os desvios não seja superior a  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  durante o período de condicionamento.

Caso as leituras do torque sejam superiores a 98% da capacidade do aparelho nas temperaturas mais baixas do ensaio, deve-se diminuir a velocidade de rotação e continuar o ensaio, ou repetir com uma haste de diâmetro inferior e com o volume adequado (de amostra).

Se a leitura do torque estiver abaixo de 10% da capacidade do aparelho, aumentar a velocidade de rotação da haste ou repetir com uma haste de diâmetro maior e com o volume adequado de amostra.

Expressa-se juntamente com os resultados, a temperatura de ensaio (em graus Celsius), a haste (spindle) utilizada, a velocidade em rotações por minuto (rpm) com resultados de viscosidade em centipoise (cP). Por exemplo, viscosidade a  $135^{\circ}\text{C}$ , spindle 21, 60 rpm = 240 cP.

#### **4.2.5. Ensaio para determinação da recuperação elástica: Norma ABNT NBR 15086:2006**

##### **- Definição da recuperação elástica**

Esta Norma estabelece o método para determinação das características elásticas de materiais betuminosos por meio do ductilômetro, o ensaio deve ser realizado a  $(25 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$ , com alongamento de 20 cm e velocidade de  $(5,00 + 0,25)$  cm/min.

## - Materiais empregados na recuperação elástica

### - Ductilômetro

Aparelho capaz de manter a temperatura de ensaio com uma variação máxima de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  e de tracionar a amostra completamente imersa em água a velocidade uniforme de  $5 \text{ cm/min} \pm 5\%$ , sem vibrações. Este aparelho deve possuir uma escala em centímetros, a fim de medir o alongamento da amostra e a deformação recuperável da amostra.

### - Molde

Deve ser de latão e apresentar as dimensões mostradas nas Figuras 35 e 36.



Figura 35 – Vista parcial do molde de latão.

Fonte: Adaptado da norma ASTM 15086.

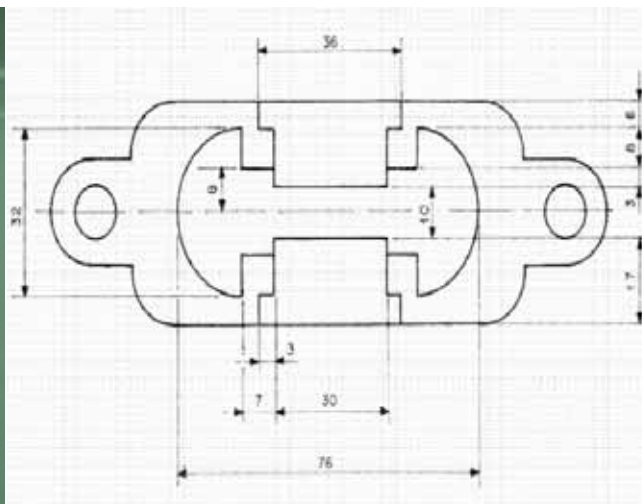


Figura 36 – Dimensões do molde.

Fonte: Adaptado da norma ASTM 15086.

### - Banho d'água para condicionamento da amostra

Deve-se ter a capacidade mínima de 10 litros e conter uma prateleira perfurada situada a pelo menos 5 cm de seu fundo, de modo que a lâmina d'água sobre a amostra seja no mínimo de 10 cm. Deve ser capaz de manter a temperatura de ensaio, com precisão de  $\pm 0,10^{\circ}\text{C}$  conforme Figuras 23 e 24.

### - Termômetro

Deve ser do tipo ASTM 63C-86 (faixa de  $-8^{\circ}\text{C}$  a  $32^{\circ}\text{C}$ ).

- *Estufa*

Capaz de manter a temperatura controlada automaticamente até 200°C, com precisão de  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

- *Tesoura*

Qualquer tipo de tesoura capaz de cortar um material betuminoso na temperatura do ensaio.

- *Béquer de vidro*

Deve Termorresistente de 250 mL.

- *Bastão de vidro*

Deve Termorresistente e de ter no mínimo 20 cm de comprimento.

**- Descrição do ensaio de recuperação elástica**

Uma amostra é tracionada até um alongamento preestabelecido, sob condições padronizadas de velocidade e temperatura, após o que é seccionado em seu ponto médio. A recuperação elástica é determinada a partir da medição do alongamento residual do corpo-de-prova após a junção das extremidades.

Amostra *in natura* deve ser aquecida cuidadosamente em uma estufa a  $(135 \pm 5)^\circ\text{C}$ , em um recipiente com tampa. Aplica-se uma camada de uma mistura de glicerina em partes iguais, ou talco ou caulim na superfície da placa e no interior das partes laterais  $s$  e  $s'$ , a fim de evitar aderência da amostra. A placa em que o molde se apoiará deve ser perfeitamente plana e nivelada, para perfeito contato da amostra. Após a preparação da amostra, misturar vigorosamente a amostra e vertê-la no molde. Ao verter a amostra no molde, cuidar para não desmontá-lo e para que seu enchimento se faça de forma homogênea. Após o enchimento deixar o molde esfriar a temperatura ambiente por  $(35 \pm 5)$  min. e colocá-lo no banho, a temperatura do ensaio, por 30 min. Retirar o molde do banho e apará-lo com uma espátula ou faca aquecida suficientemente fluida.

Deve-se Tracionar a amostra a uma velocidade uniforme de  $(5,00 \pm 0,25)$  cm/min. até o alongamento de  $(20,0 \pm 0,5)$ cm. Parar o alongamento e imediatamente cortar o corpo-de-prova no ponto médio usando a tesoura. Deixar o

corpo-de-prova na máquina de ensaio por 60 min. sem sofrer nenhuma perturbação.

Após este tempo, mover o carrinho até a posição em que as pontas apenas se toquem. Registrar o comprimento da amostra. Durante a realização de todo o ensaio, a água do tanque da máquina de ensaio deve cobrir a amostra pelo menos 2,5 cm e não deve variar mais do que 0,5°C.

Se o material betuminoso entrar em contato com a superfície da água ou com o fundo do tanque, o ensaio deve ser desconsiderado. Se a amostra romper durante a tração em três ensaios, relatar que a recuperação elástica não pode ser obtida sob as condições do ensaio.

Se a amostra romper antes de atingir o alongamento pretendido, o ensaio deve ser descartado e refeito.

Para o cálculo a recuperação elástica deve-se utilizar a seguinte expressão:

$$\text{Recuperação, (\%)} = \frac{E - X}{E} \times 100 \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

E - é o comprimento após a tração da amostra, em centímetros;

X - é o comprimento da amostra após a justaposição das pontas, em centímetros;

Para-se finalizar, deve-se calcular a média dos três ensaios expressa em número inteiro mais próximo, como a recuperação elástica da amostra, anotando a temperatura de ensaio e o comprimento após a tração da amostra (E).

## 5. Análise e discussão dos resultados

Esse capítulo faz parte da 4ª parte das ações metodológicas definidas, onde descreve-se as características do asfalto borracha, foram produzidas em laboratório quatro composições (conforme Tabela 6), e para cada composição produziu-se três replicas, para cada replica realizou-se um ensaio original, totalizando para cada composição três ensaios.

As médias dos resultados encontrados estão apresentados na Tabela 7, é importante ressaltar que destacado em vermelho na 3ª coluna esta a faixa que serviu de base para as comparações, com todos os ensaios e especificações aplicáveis, já os respectivos resultados dos experimentos realizados (composições 1, 2, 3 e 4), apresentam-se abaixo da sua respectiva composição.

Tabela 7 – Características analisadas do cimento asfáltico modificado por polímero SBS e do asfalto modificado com borracha pneu moído.

DNIT 129/2010 – Especificação de Materiais									
Grau (Ponto de Amolecimento mín. / Recuperação Elástica mín.)	Unidade	55/75	60/85	65/90	COMPOSIÇÕES				Método ABNT NBR
Ensaio na amostra original		Limite da Especificação			1	2	3	4	
Penetração 25/C, 5s, 100g	0,1mm	45-70	40-70	40-70	48	69	60	45	6576
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	55	60	65	62	55	58	62	6560
Ponto de Fulgor, mín.	°C	235	235	235	> 235	> 235	> 235	> 235	11341
Viscosidade Brookfield 135°C, spindle 21, 20 rpm, máx.	cP	3000	3000	3000	2850	3950	4070	4350	15184
Viscosidade Brookfield 150°C, spindle 21, 50 rpm, máx.	cP	2000	2000	2000	1765	3250	3480	3670	15184
Viscosidade Brookfield 177°C, spindle 21, 100rpm, máx.	cP	1000	1000	1000	490	1450	1910	2200	15184
Ensaio de Separação de Fase, máx.	°C	5	5	5	2,3	7	8	9	15166
Recuperação Elástica a 25/C, 20cm, mín.	%	75	85	90	88	51	54	59	15086

Analisando os resultados apresentados na Tabela 7, fica evidente que a Composição 1, que é a mais comumente utilizada pelas pavimentadoras se enquadra totalmente dentro da faixa 60/85 faixa essa que serviu de parâmetro, ou seja, de base para a comparação entre os asfaltos e as composições, a Tabela 8 mostra a média dos três experimentos realizados para a composição 1.

Tabela 8 – Média dos ensaios realizados na composição 1, asfalto convencional SBS.

Teor de SBS (%)	Penetração (1/10mm)	Ponto de Amolecimento(°C)	Separação de Fase (%)	Recuperação Elástica (%)	Viscosidade Bkf 135°C	Viscosidade Bkf 150°C	Viscosidade Bkf 177°C
3	48	62	2	88	2850	1765	490
3	49	63	3	88	2800	1770	490
3	47	61	2	88	2990	1775	490
Média	48	62	2,3	88	2850	1770	490

Os resultados demonstram-se de forma gráfica nas Figuras 37, 38, 39, 40 e 41.

Para os ensaios de Ponto de Fulgor adotou-se o mesmo procedimento (três experimentos realizados), e todas as composições enquadram-se na especificação proposta, apresentaram um resultado superior ao limite mínimo estabelecido de 235°C.

Quanto às composições 2, 3 e 4 temos:

**a) Características que atendem a norma e aos parâmetros estabelecidos para faixa 60/85.**

- Penetração as composições 2, 3 e 4 atendem (avalia “dureza” e a consistência do material) demonstra-se graficamente na Figura 37;
- Ponto de Amolecimento somente a composição 4 atende (ponto em que o material começa a fluir, ou seja, começa a passar do estado sólido para líquido), demonstra-se graficamente na Figura 38.
- Ponto de fulgor as composições 2, 3 e 4 atendem, (indica uma temperatura segura de para poder se trabalhar).

Demonstra-se nas Tabelas 9 e 10 as médias dos resultados para as composições 2, 3 e 4.

Tabela 9 – Média dos ensaios realizados na composição 2.

<b>Compo- sição 2 ASf. Borracha (%)</b>	<b>Penetração (1/10mm)</b>	<b>Ponto de Amolecimen- to (°C)</b>	<b>Separação de Fase (%)</b>	<b>Recupe- ração Elástica (%)</b>	<b>Viscosi- dade Bkf 135°C</b>	<b>Viscosi- dade Bkf 150°C</b>	<b>Viscosi- dade Bkf 177°C</b>
15	70	55	8	51	3950	3500	1420
15	69	55	7	51	4100	3250	1460
15	68	55	6	51	3800	3200	1470
Média	69	55	7	51	3950	3250	1450

Tabela 10 - Média dos ensaios realizados na composição 3.

<b>Compo- sição 3 ASf. Borracha (%)</b>	<b>Penetração (1/10mm)</b>	<b>Ponto de Amolecimen- to (°C)</b>	<b>Separação de Fase (%)</b>	<b>Recupe- ração Elástica (%)</b>	<b>Viscosi- dade Bkf 135°C</b>	<b>Viscosi- dade Bkf 150°C</b>	<b>Viscosi- dade Bkf 177°C</b>
18	60	59	8	54	4070	3500	1900
18	60	58	8	56	4090	3480	1920
18	60	57	8	52	4050	3460	1910
Média	60	58	8	54	4070	3480	1910

Tabela 11 - Média dos ensaios realizados na composição 4.

<b>Compo- sição 4 ASf. Borracha (%)</b>	<b>Penetração (1/10mm)</b>	<b>Ponto de Amolecimen- to (°C)</b>	<b>Separação de Fase (%)</b>	<b>Recupe- ração Elástica (%)</b>	<b>Viscosi- dade Bkf 135°C</b>	<b>Viscosi- dade Bkf 150°C</b>	<b>Viscosi- dade Bkf 177°C</b>
20	45	61	9	58	4300	3690	2100
20	45	62	9	59	4350	3670	2300
20	45	63	9	60	4400	3650	2200
Média	45	62	9	59	4350	3670	2200

Demonstra-se graficamente na Figura 37 a média dos resultados para as quatro composições com seus respectivos teores de polímeros (composição 1 - SBS

3%; composição 2- borracha 15%, composição 3 - borracha 18% e composição 4 - Borracha 20%).

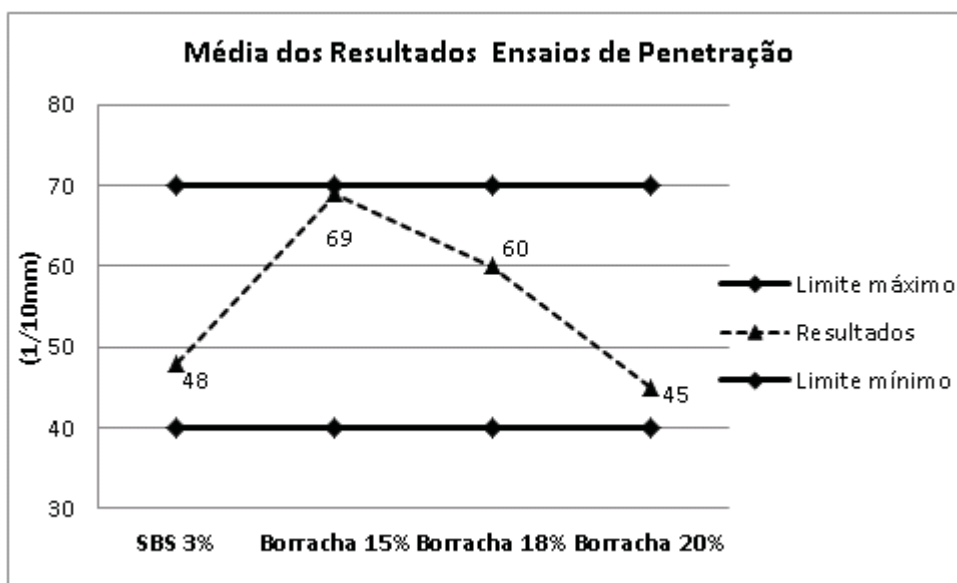


Figura 37 - Demonstração gráfica das médias dos resultados de penetração das composições 1, 2, 3 e 4.

### b) Características que não atendem a norma e aos parâmetros estabelecidos para faixa 60/85.

- Em relação ao Ponto de Amolecimento as composições 2 e 3 não atendem, (ponto em que o material começa a fluir, ou seja, começa a passar do estado sólido para líquido), essa é uma característica importante, pois o não atendimento desse requisito pode causar deformação permanente, demonstra-se os resultados graficamente na Figura 38.

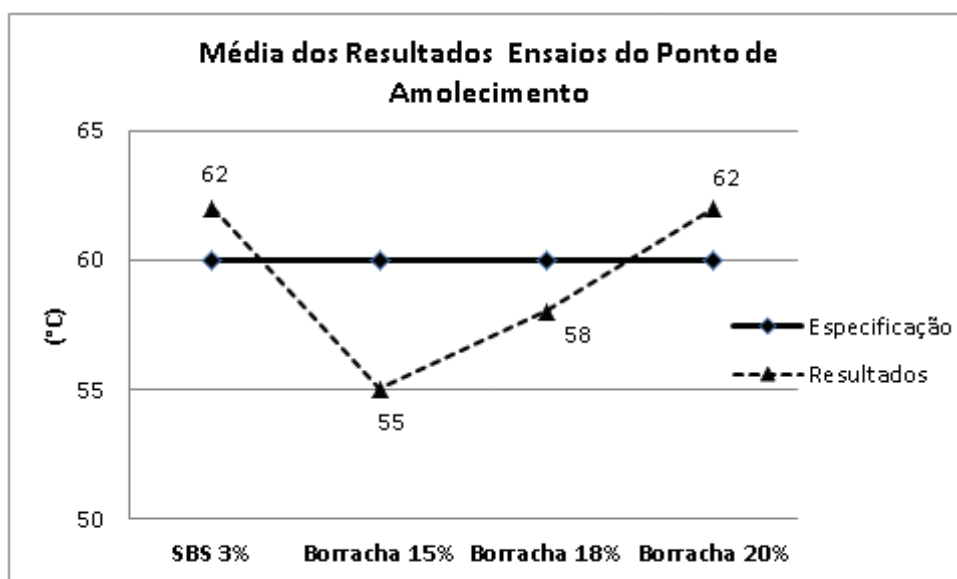


Figura 38 - Demonstração gráfica das médias dos resultados de ponto de amolecimento das composições 1, 2, 3 e 4.

- Viscosidade máxima estabelecida: as composições 2, 3 e 4 não atendem (consistência e cisalhamento indica a facilidade de bombeado do material); os resultados demonstra-se graficamente na Figura 39 (composição 1 - SBS 3%; composição 2- borracha 15%, composição 3 - borracha 18% e composição 4 - Borracha 20%).

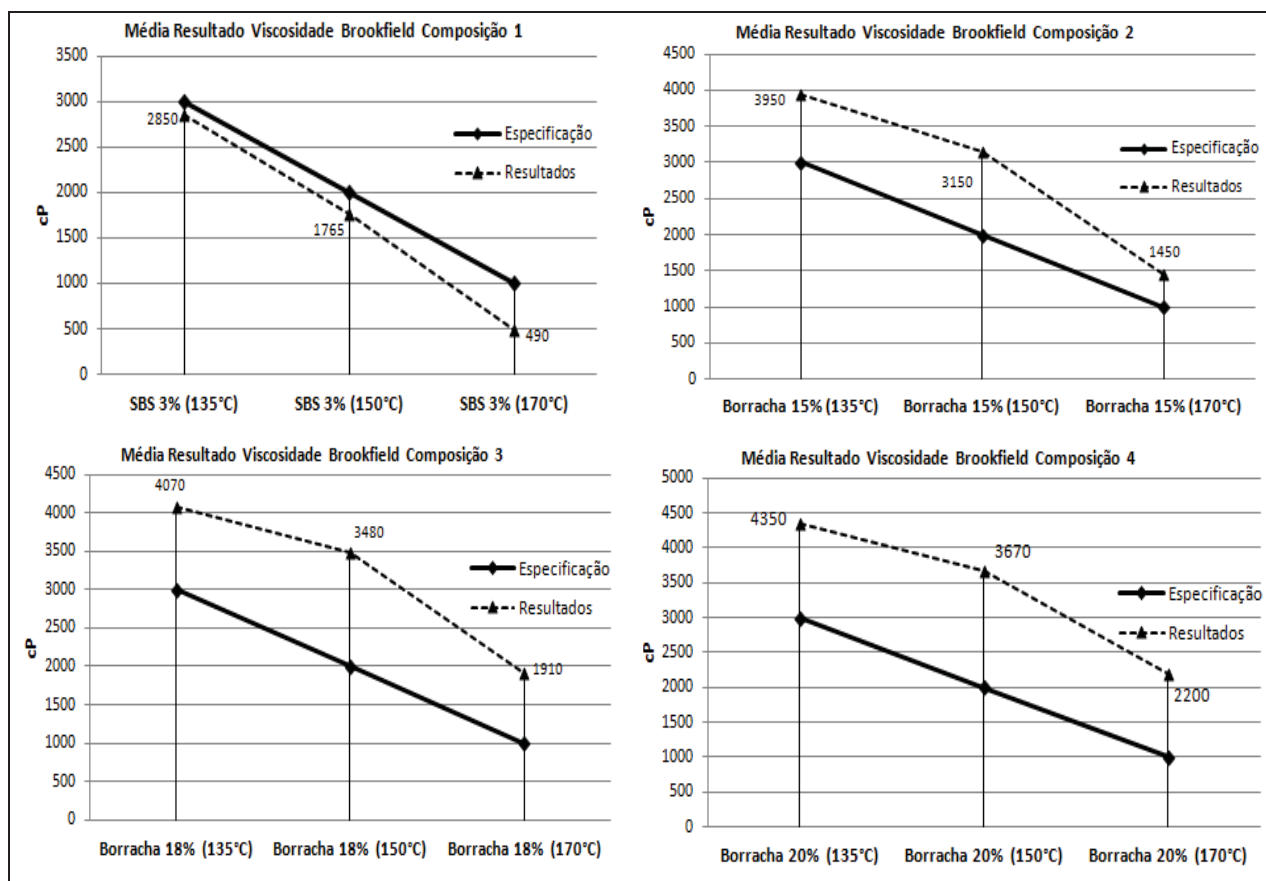


Figura 39 - Demonstração gráfica das médias dos resultados de viscosidade brookfield nas temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C das composições 1, 2, 3 e 4.

- Ensaio de separação de fases: as composições 2, 3 e 4 não atendem, Armazenamento 500ml em estufa a 163°C, 5 dias, (diferença entre os ensaios iniciais devido ao armazenamento, indica uma possível decantação ou separação dos componentes), os resultados demonstra-se graficamente na Figura 39 (composição 1 - SBS 3%; composição 2- borracha 15%, composição 3 - borracha 18% e composição 4 - Borracha 20%).

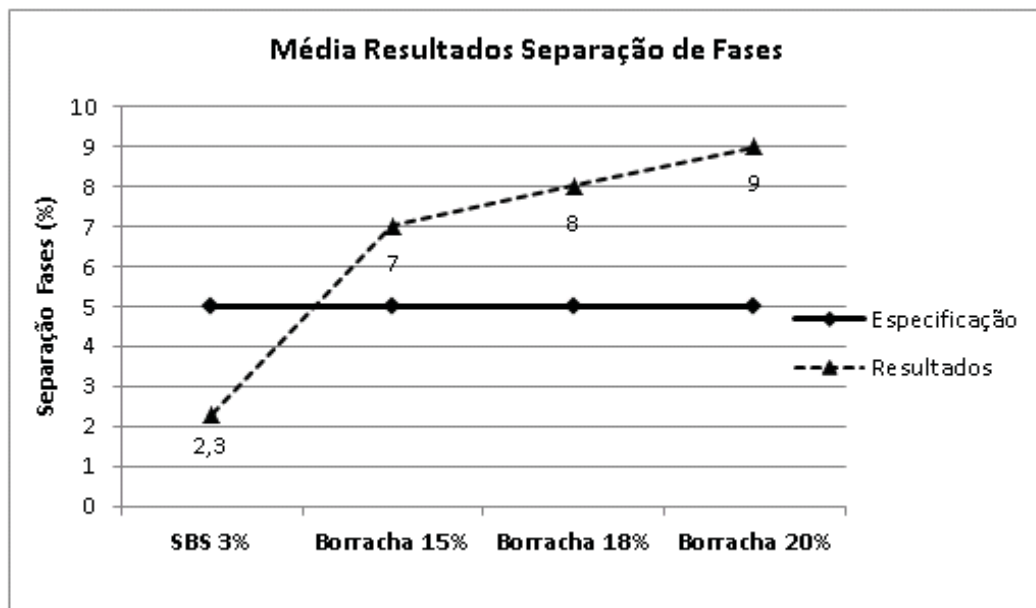


Figura 40 - Demonstração gráfica das médias dos resultados de Separação de Fases.

- Recuperação elástica as composições 2, 3 e 4 não atendem, memória elástica do material, por ter características elásticas deve retornar no mínimo 85% do seu comprimento inicial.

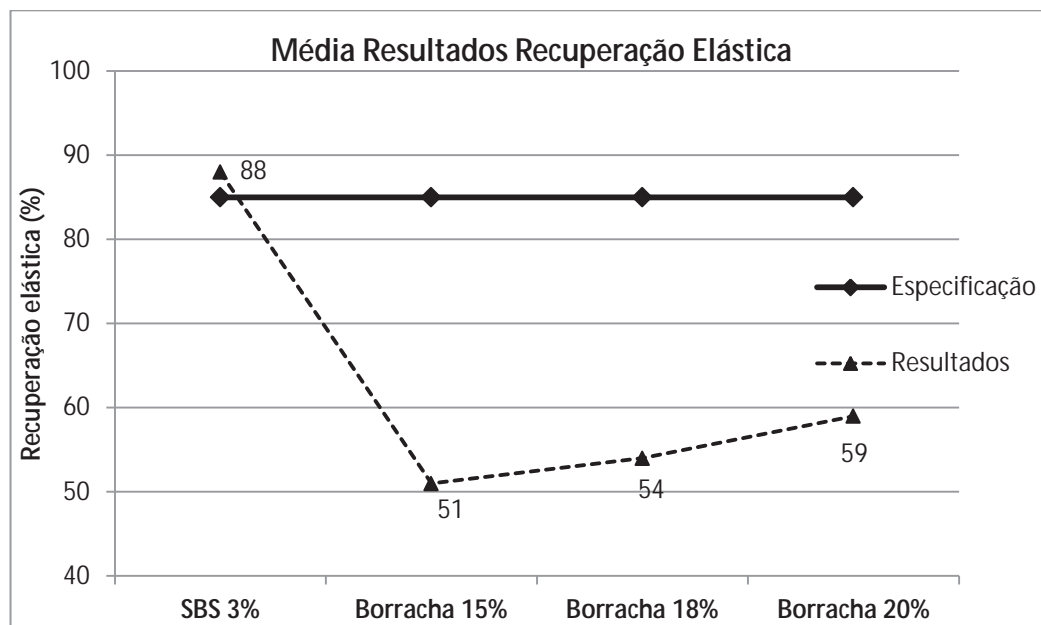


Figura 41 - Demonstração gráfica das médias dos resultados de Recuperação Elástica.

## 6. Considerações finais

Através dos ensaios, percebe-se que os dois materiais possuem características distintas, como por exemplo, no que diz respeito à penetração e ao ponto de amolecimento, com comportamento inversamente proporcional, conforme mostrado nas Figuras 37 e 38.

Quanto maior o teor de borracha, maior o ponto de amolecimento e menor a penetração, ou seja, quanto mais borracha maior a consistência e maior a temperatura para o material começar a fluir.

Quanto à viscosidade, conforme mostrado na Figura 39, o comportamento é o mesmo que o do ponto de amolecimento, quanto maior o teor de borracha maior a viscosidade, ou seja, ocorre um aumento na consistência o que pode dificultar seu manuseio durante a aplicação. Mas, para corrigir e abaixar a viscosidade e aumentar a penetração se faz necessária à adição de mais óleo extensor, só que com a adição de mais óleo pode ocorrer à diminuição no ponto de amolecimento, tendo em vista que, o ponto de amolecimento já se encontra abaixo do mínimo especificado (55°C na composição 2 e 58°C na composição 3), corre-se então o risco de com a adição de mais óleo extensor a composição 4 (com 62°C de ponto de amolecimento) também sair fora do especificado. Um balanceamento nas composições 2, 3 e 4 seriam necessários para que essa característica não seja muito prejudicada e o ponto de amolecimento não diminua muito.

O ponto de amolecimento é uma característica importante durante a aplicação do asfalto, pois, em regiões onde o calor é muito intenso, pode ocasionar escorrimento, comumente chamado na pavimentação de deformação permanente (semelhante aos trilhos, que se formam em estradas de terra com a passagem de veículos).

Nos ensaios de separação de fases, nota-se diferença entre as composições 2, 3 e 4, e fica evidente que quanto maior o teor de borracha maior é essa separação, o que é preocupante, pois isso indica que quando o material ficar armazenado ou até mesmo durante transporte pode ocorrer uma possível decantação ou separação dos componentes, o que pode causar entupimento de tubulações e dificultar a aplicação do material. E um dos problemas mais graves é em relação à separação de fases, diz respeito aos teores de asfalto e borracha, que podem ser diferentes para cada parte da estrada, pois pode-se ter uma

concentração maior de borracha em uma parte da estrada do que em outra, obtendo-se resultados de performances diferentes, ficando difícil mensurar o desempenho.

Quanto ao ensaio de recuperação elástica apesar das composições 2, 3 e 4 não atender a especificação, apresentam resultados que podem ser classificados como muito interessantes, pois quando analisa-se um material nobre e “virgem” como o SBS encontra-se um retorno elástico no valor de 88%, e as formulações 2, 3 e 4 apresentaram um retorno com valores próximo dos 50% , essa característica é muito significativa, pois apesar de não ser alvo dessa pesquisa se pegarmos o CAP convencional o mesmo irá apresentar um retorno elástico na ordem dos 5%.

Morilha e Trichês (2003) salientaram que a recuperação elástica do asfalto borracha pode aumentar em função do ensaio de envelhecimento (nesse trabalho esse ensaio não foi realizado). No asfalto borracha há um ganho na recuperação elástica. A causa para este efeito pode estar na severidade do ensaio que expõe o asfalto, a um aquecimento maior localizado, colaborando para ocorrência de uma maior interação entre as moléculas de borracha e de asfalto, proporcionando uma continuação do processo de fusão, melhorando consequentemente a recuperação elástica.

Os percentuais de borracha e óleo extensor utilizado nesse trabalho tiveram como referências os principais estudos já realizados no país, utilizando-se nos ensaios, os materiais produzidos na região, priorizando a seleção de materiais locais.

Um ponto que merece destaque são custos dos produtos, quando comparamos os custos levando-se em consideração as formulações estudadas, identificamos que o asfalto com borracha possui um custo menor de 12%; 11,5% e 10,9% em relação ao asfalto modificado com SBS, esses custos estão baseados somente nos custos dos materiais, ou seja, não leva-se em consideração a execução dos serviços de pavimentação, demonstra-se na Tabela 12 os custos para as quatro composições.

Tabela 12 - Custos das quatro composições.

Materiais	R\$ UNIT.	Comp. 1 (%)	R\$ UNI.	Comp. 2 (%)	R\$ UNI	Comp. 3 (%)	R\$ UNI	Comp. 4 (%)	R\$ UNI
SBS	6,600	0,035	0,231	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Óleo Extendor	2,000	0,015	0,030	0,150	0,300	0,180	0,360	0,200	0,400
CAP 50/70	1,000	0,950	0,950	0,700	0,700	0,640	0,640	0,600	0,600
Borracha Pneu	0,400	0,000	0,000	0,150	0,060	0,180	0,072	0,200	0,080
		R\$ Total	1,211	R\$ Total	1,06	R\$ Total	1,072	R\$ Total	1,08

Outro ponto importante que também merece destaque, é que as composições que foram elaboradas e ensaiadas se enquadram dentro da norma DNIT 111/2009 – EM, nas características de penetração, ponto de amolecimento e fulgor, viscosidade brookfield, recuperação elástica (ductilômetro) e estabilidade a estocagem, essa norma é específica para asfalto modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida.

Durante a pesquisa foi possível observar que várias literaturas apresentam diferentes soluções em relação à reciclagem de pneus usados, algumas até sendo empregadas com sucesso econômico.

Mesmo com a Resolução nº 416/09 do CONAMA e a Política Nacional dos Resíduos Sólidos de 02 de agosto de 2010, onde existe obrigatoriedade da reciclagem progressiva, o que se verifica, na atualidade, é o não cumprimento, pois a destinação dada aos resíduos provenientes da manufatura da borracha, em sua maioria, ainda é nos lixões. Esta destinação, além de poluir o meio ambiente, serve como criadouro de insetos transmissores de doenças.

De uma forma geral, a minimização do descarte de pneus inservíveis requer uma significativa mudança de comportamento, tanto em nível de processo industrial como também do consumidor, associada a um plano de gerenciamento ambientalmente adequado. Há falta de políticas públicas nos vários níveis de governo, objetivando-se eliminar de forma mais eficaz o passivo ambiental.

A durabilidade das estradas e ruas pode ser melhorada com a utilização de um asfalto com mais qualidade e melhores características, fabricado com o resíduo de pneus inservíveis, trazendo benefício ecológico e social para a população.

Analisando os resultados obtidos nos ensaios é prematuro dizer se as características que mostraram-se distintas entre o asfalto borracha e o asfalto modificado convencional SBS são prejudiciais à qualidade final do asfalto, mas fica evidente que o asfalto borracha possui características que podem ser trabalhadas, e várias são as possibilidades na busca por melhorias:

- Adicionar mais óleo extensor para se trabalhar a viscosidade e a consistência;

- Variar a quantidade de pó de borracha, pois através dessa variável também pode-se trabalhar a viscosidade e a consistência. É importante comentar que a formulação 4 (com maior percentual de borracha), obteve uma consistência melhor,

e que o ponto de Amolecimento também foi maior (55°C na formulação 2 e 62°C na formulação 4);

- Alterar os tempos de reação (mistura e dispersão), já que Morilha e Triches 2003, observaram que quando submetido há mais tempo a uma alta temperatura (5 dias a 163°C) para realização do ensaio de recuperação elástica houve uma melhora no resultado, ou seja, houve um aumento nas elasticidades dos materiais. Essa é uma propriedade importante e pode ser explorada na realização de novos ensaios.

O importante é que as informações obtidas junto aos ensaios realizados no trabalho em análise servem de base para outros estudos sobre o tema, tendo em vista que muita coisa ainda pode ser realizada, contribuindo na busca da melhoria dos padrões de qualidade de vida junto ao meio ambiente.

Como sugestão de futuros trabalhos com asfalto borracha, deve-se realizar experimentos com asfaltos e óleos de várias regiões do país, pois, as características do asfalto e do óleo variam muito de região para região. Também é importante realizar ensaios mecânicos das misturas e do ligante, ensaios ambientais para verificar se o material é mais ou menos contaminante que o CAP modificado com polímero, realizar os demais ensaios que fazem parte da especificação DNIT 129/2010 – EM, além de submetê-lo a especificação *Superpave*.

Considerando todos os benefícios econômicos e ecológicos que a utilização do asfalto borracha pode trazer, é necessário que os fabricantes de pneus, órgãos reguladores e fiscalizadores, universidades e os institutos de pesquisas trabalhem em parceria para juntos encontrem soluções corretamente ambientais que auxiliem na solução do gravíssimo problema que é a disposição final de pneus usados no Brasil e no mundo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEIRAHMAN, M., 2006. Controlling the Performance of Crumb Rubber Modifier (CRM) Binders through the Addition of Polymer Modifiers. 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.

ABETRE - Associação Brasileira de Empresas de Tratamento. Recuperação e Disposição de Resíduos Especiais. Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./residuos/index.php3&conteudo=./residuos/lixo.html>>. Acesso em: 18 dez. 2009.

ABIP - Associação Brasileira da Indústria de Pneus Remoldados. Disponível em: <[http://www.abip.com.br/abip/pneu/pne\\_beneficios.php](http://www.abip.com.br/abip/pneu/pne_beneficios.php)>, acesso em: 14 de janeiro de 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NRB 6560: Materiais Betuminosos - determinação do ponto de amolecimento – método do anel e bola. Rio de Janeiro: ABNT, dezembro 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NRB 6576: Materiais Asfálticos - determinação da penetração. Rio de Janeiro: ABNT, dezembro 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, novembro 2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NRB 11341: Derivados de Petróleo - determinação do ponto de fulgor. Rio de Janeiro: ABNT, dezembro 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NRB 15086: Materiais Betuminosos - determinação da recuperação elástica. Rio de Janeiro: ABNT, maio 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NRB 15184: Materiais Betuminosos - determinação da viscosidade brookfield em elevadas temperaturas. Rio de Janeiro: ABNT, dezembro 2004.

ABIQUIM – Associação Brasileira da Indústria Química. Disponível em: <<http://www.abiquim.org.br/>>. Acesso em: 15 jan. 2011.

ABIP - Associação Brasileira do Segmento de Reformas de Pneus. Disponível em: <<http://www.abr.org.br/indicadores>>, acesso em: 15 de setembro de 2007.

ABIP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PNEUS REMOLDADOS. Notícias da ABIP. Disponível em: [http://www.abip.com.br/site/noticias/not\\_noticias](http://www.abip.com.br/site/noticias/not_noticias)> Acesso em 05 fev. 2009.

ABR - Associação Brasileira dos reformadores de pneus. Disponível em: <[http://www.abr.org.br/Revistas/revista\\_65cona.html](http://www.abr.org.br/Revistas/revista_65cona.html)> . Acesso em 20 dez. 2010.

ABRIDUPI - Associação Brasileira dos Fabricantes, Distribuidores e Importadores de pneus de bicicletas, peças e acessórios (ABRIDUPI). Disponível em: <http://www.abradibi.com.br/premio/detalhes.html>. Acesso: 02 jan.2010.

ALMEIDA, M.C. Estudo do Ciclo de Vida do Pneu Automotivo e oportunidade para disposição final de pneus inservíveis. In: KAMIMURA, Eliane. Potencial dos resíduos de borracha de pneus pela indústria da construção civil. Dissertação de Mestrado De Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2002.

ANDRIETTA, A. J. Pneus e meio ambiente: um grande problema requer uma grande solução. Out. 2002. Disponível em: <<http://www.reciclarepreciso.hpg.ig.com.br/recipneus.htm>>. Acesso: 18 Dez. 2010.

ANIP - Associação Nacional de Indústrias de Pneumáticos. Disponível em: <<http://anip.com.br>>. Acesso: 28 dez. 2010.

AREBOP - Associação Nacional das Empresas de Reciclagem de Pneus e Artefatos de Borrachas. Disponível em: <<http://www.arebop.org.br/noticia.asp?cod=121>>. Acesso em: 02 dez. 2009.

AREBOP - Associação Nacional das Empresas de Reciclagem de Pneus e Artefatos de Borrachas. Disponível em: < <http://www.arebop.org.br/inservivel.asp>> Acesso em: 03 fev. 2011.

ARTESANATO PNEUS – Artesanato em pneus. Disponível em: <<http://artesanatoempneus.blogspot.com>>. Acesso em: 12 jan. 2011.

ASTM – American Society for Testing and Materials. D - 6114-97 - Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder.

BAKER, T.E.; ALLEN, T.M.; JENKINS, D.V.; MOONEY, T.M.; PIERCE, L.M.; CHRISTINE, R.A.; WESTON, J.T., 2003. Evaluation of the Use of Scrap Tires in Transportation Related Applications in the State of Washington. Report to the Legislature as Required by SHB 2308. Washington State Department of Transportation. Olympia, Washington, USA.

BERTOLLO, S. A. M.; FERNANDES JR., J. L.; SCHALCH, V.. Benefícios da Incorporação de Borracha de Pneu em Pavimentos Asfálticos, In: XXVIII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA (2002), Cancun, México, 8 p., disponível em: <[www.resol.com.br/textos/reciclagem de pneus.pdf](http://www.resol.com.br/textos/reciclagem_de_pneus.pdf)> Acesso em: 28 mai. 2009.

BRIDGESTONE, Bridgestone do Brasil. Fabricante de pneus. Disponível em: [http://www.pneuseguro.com.br/index.asp?page=partes\\_do\\_pneu](http://www.pneuseguro.com.br/index.asp?page=partes_do_pneu) . Acesso em 02 jan. 2010.

CEMPRE. Pneus: o mercado para reciclagem. Disponível em: <<http://www.cempre.org.br/fichastécnicas/pneu>> Acesso em 20. Jun, 2008.

CICLOVIVO. Disponível em: <[http://www.ciclovivo.com.br/noticia.php/1007/brasil\\_reciclou\\_mais\\_de\\_146\\_mil\\_toneladas\\_de\\_pneus\\_no\\_1\\_semestre\\_de\\_2010/](http://www.ciclovivo.com.br/noticia.php/1007/brasil_reciclou_mais_de_146_mil_toneladas_de_pneus_no_1_semestre_de_2010/)>. Acesso em 04 jan. 2010.

CIMINO, M. A. Gerenciamento de pneumáticos inservíveis: análise crítica de procedimentos operacionais e tecnologias para minimização adotadas no território nacional. 2004. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos (SP). Disponível em:[http://www.btdt.ufscar.br/tde\\_arquivos/11/TDE-2004-11-24T14:36:19Z-247/Publico/DissMAC.pdf](http://www.btdt.ufscar.br/tde_arquivos/11/TDE-2004-11-24T14:36:19Z-247/Publico/DissMAC.pdf). Acesso em: 19 maio 2009.

SILVA, S. C. C. Ensaio Comparativos de Mistura Asfáltica Pré- Misturado a Frio com Adição de Borracha de Pneu. 2008. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista. Bauru (SP).

CIMINO, M.; ZANTA, V. Gerenciamento de pneumáticos inservíveis (GPI): análise crítica de ações institucionais e tecnologias para minimização. Artigo Técnico – Engenharia Sanitária Ambiental. Vol. 10. n.4. out/dez/2005, p.299-306. Disponível em: [http://www.artigocientifico.com.br/uploads/artc\\_1142630549\\_95.pdf](http://www.artigocientifico.com.br/uploads/artc_1142630549_95.pdf). Acesso em: 25 abr.2009.

COCAMAR - Cooperativa Agroindustrial – Disponível em:<<http://www.cocamar.com.br>>, acesso em: 15 de setembro de 2009.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA no. 258, de 26 de agosto de 1999. *Resoluções*. Disponível em <http://www.mma.gov.br>. Acesso em 16 out. 2009.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA no. 301, de 21 de março de 2002. *Resoluções*. Disponível em <http://www.mma.gov.br>. Acesso em 16 Out. 2009.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA no. 416, de 01 de outubro de 2009. *Resoluções*. Disponível em <http://www.mma.gov.br>. Acesso em 16 jan. 2011.

Costa, H.M.; Visconte, L.L.Y.; Nunes, R.C.R., 2003. Historical Aspects of vulcanization. *Polímeros*, April/June 2003, vol.13, no.2, p.125-129. ISSN 0104-1428. São Paulo, SP, Brasil.

CUNHA, V. & CAIXETA FILHO, J. V. Gerenciamento da coleta de resíduos sólidos urbanos: estruturação e aplicação de modelo não-linear de programação por metas. *Gestão & Produção*. São Carlos, Vol. 9, n. 2, ago.2002.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/>. Acesso em 01 Dez. 2010.

EA (Environmentl Agency) – UK (Agencia Ambiental Inglesa). EA Tyres Report. Disponível em: <[http://www.environment-agency.gov.uk/envinfo/tyres/pdf/EA\\_Tyres\\_Report.pdf](http://www.environment-agency.gov.uk/envinfo/tyres/pdf/EA_Tyres_Report.pdf)>. Acesso em 08 abr 2009.

EPA - U.S. Environmental Protection Agency – Disponível em: <<http://www.epa.org>>. Acesso em: 14 de abril 2009.

FARIA, A. D. Logística Reversa: Coleta de Pneus Inservíveis junto aos Pequenos Borracheiros da Região do Grande ABC. 2006, São Caetano do Sul. Monografia (Graduação em Administração em Logística), Faculdade Editora Nacional - FAENAC.

GIL, Antonio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. São Paulo, 1999.

GRECA – Asfalto Borracha Terceira Geração. Disponível em: [http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/13%20encontro%20tecnico/05\\_Asfalto-borracha\\_Nova\\_Geracao.pdf](http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/13%20encontro%20tecnico/05_Asfalto-borracha_Nova_Geracao.pdf). Acesso em: 25 jan. 2011

FILHO, C. V. G. Levantamento do potencial de resíduos de borracha no Brasil e avaliação de sua utilização na indústria da construção civil. 2007. Dissertação de Mestrado em Tecnologia. Instituto de Engenharia do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Curitiba.

HACKBART, Rolf., LIMA , de Titan. Destinação final aos pneus. Análise da Resolução nº 258/99, CONAMA. Disponível em: <http://assessoriaopt.org/pneus.htm>. Acesso em: 18 dez. 2010.

HEITZMAN, M., 1992. Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber. Transportation Research Record nº 1339, Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.

HICKS, R.G., 2002. Asphalt Rubber Design and Construction Guidelines, Volume I – Design Guidelines. Northern California Rubberized Asphalt Concrete Technology Center (NCRACTC) and California Integrated Waste Management Board (CIWMB). Sacramento, California, USA.

HICKS, R.G.; EPPS, J.A., 2000. Quality Control for Asphalt Rubber Binders and Mixes. Rubber Pavement Association. Tempe, Arizona, USA.

Huggins, F. E. et al. J. Am. Chem. Soc. 1992, 37, 1376.

IBP - Instituto Brasileiro do Petróleo Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos. 1999. 7ª Edição. IBP/Comissão do Asfalto. Rio de Janeiro, RJ, Brasil

INTELOG – Inteligência em Gestão Logística. Disponível em: <http://www.intelog.net/site/default.asp?>. Acesso em 11 Jan. 2011.

IPR - Instituto de Pesquisa rodoviárias. Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/conheca\\_ipr.htm](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/conheca_ipr.htm). Acesso em 05 Jan. 2011.

KAMIMURA, E. Potencial dos resíduos de borracha de pneus pela indústria da construção civil. 2004. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis.

KUENNEN, T., 2005. Polymer-Modified Asphalt Comes of Age, Better Roads Magazine, USA.

LAMONTAGNE, J. Vieillissement des bitumes modifiés polymères à usage routier par simulations et techniques spectroscopiques. Marseille, 2002. Tese (Doutor em Ciências) – Faculté des Sciences et Techniques de Marseille Saint-Jérôme – Université de Droit, d’Economie et des Sciences d’Aix-Marseille III.

LEITE, L.F.M.; MOTTA, L.M.G.; BERNUCCI, L.B.; SOARES, J.B., 2000. Mechanical Behaviour of Asphalt Rubber Mixes Prepared in Laboratory. Asphalt Rubber 2000 Proceedings. Vilamoura, Portugal.

MANUAL DO ASFALTO. Instituto de Asfalto. Série do Manual Nº 4 (MS – 4), 1989. MEDINA, J.MOTTA, L. M. Mecânica de Pavimentos. Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 2005.

MARTINS, H. A. F. A Utilização Da Borracha De Pneus Na Pavimentação Asfáltica. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso Universidade Anhembi Morumbi no âmbito do Curso de Engenharia Civil com ênfase Ambiental. São Paulo. Disponível em: <[http://cursos.anhembi.br/uam/disc/tcc\\_2004/cd/15%20a%20utilizacao%20da%20borracha.pdf](http://cursos.anhembi.br/uam/disc/tcc_2004/cd/15%20a%20utilizacao%20da%20borracha.pdf)>. Acesso em: 09 jun. 2007.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA no. 416, de 30 de outubro de 2009. *Resoluções*. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=616>>. Acesso em 10 jan. 2010.

MELNYK, S. A., SROUFE R. P. & CALANTONE, R. Assessing the impact of environmental management systems on corporate and environmental performance. *Journal of Operations Management*. USA, Vol. 21, n. 3, p. 329-351, may 2003.

MORILHA JR., A.; GRECA, M. R. Considerações Relacionadas ao Asfalto Ecológico – Ecoflex. IEP, (2003), Apostila sobre Asfalto Borracha, Instituto de Engenharia do Paraná, 12 p., disponível em: <[www.iep.org.br/lit/apostila\\_asfalto\\_borracha.doc](http://www.iep.org.br/lit/apostila_asfalto_borracha.doc)> Acesso em: 20 mar. 2009.

ODA, S.; FERNANDES JÚNIOR, J. L. Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação. *Acta Scientiarum*, Maringá, v. 23, n. 6, p. 1589-1599, 2001.

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

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

OLIVEIRA, O. J.; CASTRO, R. ; PAULA, P. R. Estudo da destinação e da reciclagem de pneus inservíveis no Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 27., 2007, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: ABEPRO, 2007. 1 CD-ROM.

PLANETA SUSTENTÁVEL. Disponível em: <http://planetasustentavel.abril.com.br/noticias/brasil-descartou-9-anos-2-1-mi-toneladas-pneus-660505.shtml>. Aceso em 27 fev. 2012.

PREFEITURA, Prefeitura Municipal de Divinópolis. Disponível em: <http://www.divinopolis.mg.gov.br/imprensa/publnoticia.php?cod=984>. Acesso em 12 jan. 2011.

PREFEITURA, Prefeitura Municipal de São Paulo. Secretaria Municipal de Finanças. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/financas/servicos>. Acesso em 05 Jan. 2011.

PREFEITURA, Prefeitura Municipal Goiânia. Núcleo de defesa do Meio Ambiente. Disponível em: [http://www.goiania.go.gov.br/sistemas/snger/asp/snger01010r1.asp?varDt\\_Noticia=10/02/2009&varHr\\_Noticia=08:09](http://www.goiania.go.gov.br/sistemas/snger/asp/snger01010r1.asp?varDt_Noticia=10/02/2009&varHr_Noticia=08:09). Acesso em Dez. 2009.

RPA, 2006. Ground Tire Rubber in Asphalt Paving Applications. Cliff Ashcroft. Asphalt-Rubber Research and Development. Asphalt-Rubber Association, Tempe, Arizona, USA.

RAMOS, L. S. N. A logística Reversa de Pneus Inservíveis: O problema da Localização dos Pontos de Coleta. Dissertação de Mestrado. 2005, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis.

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; DUNNING, R.L., 1989. Investigation and Evaluation of Ground Tire Rubber in Hot Mix Asphalt. National Center for Asphalt Technology nº 89-3. Auburn, Alabama, USA.

RODRIGUES, M. R. P.; Caracterização e utilização do resíduo da borracha de pneus inservíveis em compósitos aplicáveis na construção civil. Tese (Doutorado). 2008. Universidade de São Paulo, Programa de Pós - Graduação e Área de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental, São Carlos.

RECICLANIP – Entidade civil sem fins lucrativos formada pela Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. Disponível em: [http://www.reciclanip.com.br/?cont=quemsomos\\_institucional](http://www.reciclanip.com.br/?cont=quemsomos_institucional). Acesso em 04 jan. 2011.

RECICLANIP – Entidade civil sem fins lucrativos formada pela Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. 2º Seminário Regional Sul de Resíduos Sólidos – Londrina, julho/07, 29 p.

REIS C. & FERRÃO P. - " PROTAP - Produção, utilização e opções de fim de vida para pneus". Instituto Superior Técnico, Lisboa (2000).

RESCHNER, K. An overview of commercially available scrap tire processing and rubber recycling methods. Disponível em: <http://home.snafu.de/kurtr/str/en.html> Acesso em 30 abr. 2009.

RESOL, Resol Engenharia Ltda. Compilação de Diversas Legislações Ambientais no Brasil, 2002. Disponível em: <http://www.resol.com.br> Acessado em: 21 dez. 2009.

RUBBER MANUFACTURERS ASSOCIATION. Scrap tire management council 1990-2000: ten years of success. Disponível em: [http://www.rma.org/arquivo de notícias](http://www.rma.org/arquivo_de_noticias) Acesso em: 24 mar. 2009.

RUBBER MANUFACTURERS ASSOCIATION - "U.S. Scrap Tires Markets 2005 Report". Disponível em: <<http://www.rma.org>>, acesso em: 10 de jul. de 2009.

RUBBER MANUFACTURERS ASSOCIATION. Scrap tire management council 1990-2000: ten years of success. Disponível em:<[http://www.rma.org/arquivo de notícias](http://www.rma.org/arquivo_de_noticias)> Acesso em: 24 mar. 2009.

SALINI, R. B. Utilização de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas. Dissertação de Mestrado, 2000, 120 p. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SANDRONI, M.; PACHECO, E. B. A. V. O Destino Dos Pneus Inservíveis. 2005. Disponível em: <<http://www.niead.ufrj.br/artigoelen.htm>>. Acesso em: 29 mar. 2007.

SANTOS, R. S. Avaliação do comportamento do concreto com adição de borracha obtida a partir da reciclagem de pneus para aplicação em elementos pré-moldados. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 1; ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10, 2004, São Paulo. Anais.... São Paulo, 2004.

SEMA – Secretaria do Meio Ambiente. Disponível em: [http://www.votorantim.sp.gov.br/sema/residuos\\_solidos/residuos\\_solidos.html](http://www.votorantim.sp.gov.br/sema/residuos_solidos/residuos_solidos.html), acesso em: 01 jul. 2011.

SILVA, S. C. C. Ensaio Comparativos de Mistura Asfáltica Pré- Misturado a Frio com Adição de Borracha de Pneu. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista – Programa de pós graduação em ciência e tecnologia de materiais. Bauru, São Paulo, 2008.

SILVA, I. S. Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos. Influência da adição de polímeros e comportamento frente a radiação UV. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia do Rio Grande do Sul, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2005.

SILVA, S. C. C. Ensaio Comparativos de Mistura Asfáltica Pré- Misturado a Frio com Adição de Borracha de Pneu. 2008.

SHALABY, A.; KHAN, R.A.; - Design of unsurfaced roads constructed with large-size shredded rubber tires: a case study. Resour Conserv Recycl, 2005; 44:318-332.

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.

SOLID WASTE. Unsolved Landfill Mysteries – The case of the Floating Tire. Disponível em: <<http://www.solidwaste.com/content/new/article.asp?>> Acesso em: 24 ago. 2009.

TAKALLOU, H.B.; TAKALLOU M.B., 2003. Effects of Mixing Time and Temperature on the Viscoelastic Properties of Asphalt Rubber Binder. Asphalt Rubber 2003, Proceedings. Brasília, Brazil.

TFHRC, 2005. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. Turner Fairbank Highway Research Center. FHWA, Federal Highway Administration. Washington, D.C., USA.

TRELOAR, L.R.G. The Physics of Rubber Elasticity. 3rd Edition. Oxford. USA, 1975.

VISSER, A.T. & VERHAEGHE, M.B., 2000. Bitumen Rubber: Lessons Learned in South Africa. Asphalt Rubber 2000, Proceedings. Vilamoura, Portugal.

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.

VOLLE, T.H., 2000. Performance of Rubberized Asphalt Pavements in Illinois. Illinois Department of Transportation. Illinois, USA.

WORLD ROAD ASSOCIATION (PIARC) – TECHNICAL COMMITTEE FLEXIBLE ROADS (C8). Use of Modified Bitumen Binders Special Bitumen and Bitumen With Additives in Pavement Applications. International Workshop Modified Bitumen. Roma, 1998.