



Potencial de Utilização de Pneus Usados em Pavimentação Asfáltica no BRASIL

Curso de Especialização em
**“Gestão Ambiental no
Setor Transportes”**

SUMÁRIO

RESUMO EXECUTIVO

INTRODUÇÃO

CAPÍTULO I – ASPECTOS GERAIS SOBRE PNEUS

- 1.1 Histórico
- 1.2 O que é o Pneu?
- 1.3 Estrutura do Pneu
- 1.4 O Mercado do Pneu

CAPÍTULO II – ASPECTOS GERAIS SOBRE O ASFALTO

- 2.1 Antecedentes
- 2.2 Patentes
- 2.3 Mudanças nas Técnicas de Produção e Consumo
- 2.4 O que são Asfaltos?
- 2.5 Classificação

CAPÍTULO III – ASPECTOS AMBIENTAIS

- 3.1 Legislação
- 3.2 O Desafio da Reciclagem: Usos Para Pneus Usados

CAPÍTULO IV – OS PROCESSOS DE INCORPORAÇÃO DE BORRACHA DE PNEUS EM MISTURAS ASFÁLTICAS

- 4.1 Processo Úmido
- 4.2 Processo Seco

CAPÍTULO V – APLICAÇÕES DO CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO POR BORRACHA DE PNEUS

- 5.1 Aplicações
- 5.2 Proposição de Utilização do Asfalto-Borracha para Recuperação de

Rodovias Federais

CAPÍTULO VI – ASPECTOS ECONÔMICOS

6.1 Análise De Viabilidade
Econômica

6.2 Análise Do Custo Do Ciclo De
Vida

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



UnB – CDS 015es

**UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA - UNB
CENTRO DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL - CDS**

Jeanine Santana Ferrari

Luiz Carlos R. Ribeiro

Paulo Cezar Oliveira

Brasília – DF
Outubro / 2003

MONOGRAFIA

Monografia submetida ao Centro de
Desenvolvimento Sustentável da

Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Especialista em Gestão Ambiental no Setor Transportes.

Aprovado por:

Armando de Azevedo Caldeira Pires

Dr., ENM/UnB
(Orientador)

Armando de Azevedo Caldeira Pires

Dr., ENM/UnB
(Coordenador do Curso)

Antonio César Pinho Brasil Jr.

Dr., CDS/UnB
(Diretor do Centro de Desenvolvimento Sustentável)

RESUMO EXECUTIVO



Os resíduos sólidos urbanos - genericamente denominados como “lixo” – muito diversificados devido aos processos que os originam, são normalmente dispostos de maneira indiscriminada no solo, podendo causar poluição do ar pela exalação de odores, fumaça, gases tóxicos ou material particulado, poluição das águas superficiais pelo escoamento de líquidos percolados ou carreamento de resíduos pela ação de águas de chuva e poluição do solo e das águas subterrâneas pela infiltração de líquidos percolados.

Considerando a dificuldade para sua disposição, os pneus usados se constituem em um dos tipos de resíduos que acarretam graves problemas para o meio ambiente e a saúde pública.

A incorporação de borracha proveniente de pneus inservíveis em revestimentos asfálticos de pavimentos tem sido empregada há algumas décadas no exterior, principalmente no Canadá, África do Sul, Portugal, Austrália e particularmente nos Estados Unidos e de forma mais ostensiva desde 1970. Neste compasso, e com base na experiência mundial, foi iniciado o estudo da aplicação desta alternativa em nosso país.

Nas misturas asfálticas, existem dois processos – úmido e seco – de incorporação de pneus. No processo úmido (*wet process*) são adicionadas partículas finas de borracha ao cimento asfáltico, produzindo um novo tipo de ligante denominado “asfalto-borracha”. Já no processo seco (*dry process*), partículas maiores de borracha substituem parte dos agregados pétreos. Após a adição do ligante, formam um produto denominado “concreto asfáltico modificado com adição de borracha”. Experiências com o asfalto feito a base de pneus têm sido realizadas em todo o Brasil. No município de Santos (SP) o mecanismo utilizado é o processo seco. Já os estados de São Paulo e Rio Grande do Sul usam o processo úmido.

O reaproveitamento para que o pneu possa gerar um subproduto, com objetivos comerciais, observando-se as questões ecológicas e ambientais, é o caminho mais adequado. Alternativas como a reutilização de pneus descartados em obras de contenção, margens de rios para evitar desmoronamentos, construção de quebra-

mares e drenagem de gases em aterros sanitários começam a ser implementados na sociedade de forma a utilizar esse passivo ambiental. Outra destinação está ligada a reciclagem, isto é, a fabricação de novos pneus e câmaras de ar a partir dos produtos descartados, proporcionando ganhos substanciais no setor de pneumáticos.

A modificação dos ligantes asfálticos utilizados para pavimentação tem se revelado uma alternativa atrativa para melhorar as propriedades dos materiais betuminosos, principalmente em relação a sua contribuição à resistência, à fadiga e ao menor envelhecimento.

A utilização de pneu moído, ou pó de pneu como adição ao cimento asfáltico tradicional, tem se mostrado uma alternativa ambientalmente adequada, que pode apresentar grandes reduções de volume desse resíduo. Há que se considerar ainda um outro aspecto importante, qual seja a redução de custos de manutenção com a menor degradação do pavimento asfáltico com o uso.

As situações mais indicadas para a utilização do asfalto-borracha são em reforço de pavimentos com trincamentos (rupturas, fissuras, etc), construção de pavimentos novos e em situações climáticas adversas. No Brasil, onde as altas temperaturas são predominantes e as rodovias são submetidas ao tráfego intenso de cargas pesadas, essas características se tornam ainda mais atraentes.

O presente trabalho pretende abordar a destinação final dos pneus inservíveis tanto sob os aspectos ambientais quanto sob os aspectos técnicos de adição da borracha de

pneu à pavimentação asfáltica e apresentar dados de uma análise de viabilidade econômica sobre a utilização do asfalto convencional e o asfalto-borracha.

PALAVRAS-CHAVE:

ASFALTO-BORRACHA,
MEIO AMBIENTE,
ANÁLISE ECONÔMICA,
CICLO DE VIDA,
ASFALTO CONVENCIONAL.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Estrutura do Pneu
- Figura 2 – Pneu Diagonal/Pneu Radial
- Figura 3 – Processo Úmido
- Figura 4 – Custo de Manutenção
- Figura 5 – Custo do Usuário

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Uso de pneus inservíveis no Arizona em 1998
- Tabela 2 – Uso de pneus inservíveis na Califórnia em 1998
- Tabela 3 – Uso de pneus inservíveis na Flórida em 1998
- Tabela 4 – Granulometria da borracha recomendada para misturas asfálticas de graduação densa
- Tabela 5 – Meta Física-Financeira dos Programas do DNIT
- Tabela 6 – Análise de Viabilidade do Asfalto Convencional
- Tabela 7 – Análise de Viabilidade do Asfalto Borracha
- Tabela 8 – Custo reais e projetados para manutenção de rodovias (adaptado)
- Tabela 9 – Comparação dos Custos de Construção, Manutenção e do Usuário

INTRODUÇÃO



O homem vem se defrontando com o sério problema do que fazer com toneladas e toneladas de resíduos que são gerados continuamente pela sociedade.

Os resíduos sólidos urbanos - genericamente denominados como “lixo” - muito diversificados devido aos processos que os originam, são normalmente dispostos de maneira indiscriminada no solo, podendo causar poluição do ar pela exalação de odores, fumaça, gases tóxicos ou materiais particulados, poluição das águas superficiais pelo escoamento de líquidos percolados ou carreamento de resíduos pela ação de águas de chuva e poluição do solo e das águas subterrâneas pela infiltração de líquidos percolados.

Considerando a dificuldade para sua disposição, os pneus usados se constituem em um dos tipos de resíduos que acarretam graves problemas para o meio ambiente e a saúde pública.

Grandes depósitos ocupando áreas extensas ficam sujeitos à queima acidental, ou provocada, causando problemas ambientais relacionados a qualidade do ar em virtude da liberação de fumaça contendo substâncias tóxicas como dióxido de enxofre e liberação de um óleo que se infiltra e contamina o lençol freático.

Quanto à saúde pública, esses depósitos são igualmente danosos, pois os pneus servem como criadores de roedores e mosquitos, especialmente o *aedes aegypti*, que, no Brasil, é o transmissor da dengue e da febre amarela.

A baixa compressibilidade e degradação muito lenta desaconselham a sua disposição em aterros sanitários. Quando enterrado, o pneu tende a subir e sair para a superfície devido ao espaço vazio existente em sua forma.

Há uma tendência da população em abandoná-los em cursos d'água, terrenos baldios e beiras de estradas, o que agrava ainda mais o problema.

A importância ambiental em se encontrar alternativas para o consumo de pneus usados tem levado ao emprego dos mesmos em obras de contenção nas margens de rios, como recifes artificiais na construção de quebra mares, como combustível em fábricas de celulose e cimento.

Contudo, um dos usos mais nobres da matéria prima dos pneus usados é na aplicação na pavimentação asfáltica. Além de evitar que os pneus transformem-se em fonte de poluição, é possível obter um pavimento com características técnicas superiores às observadas em um asfalto convencional.

Assim, a questão subjacente ao problema da destinação final dos pneus inservíveis tem sido como fazê-la de modo adequado e sem agredir o meio ambiente. O presente trabalho trata de adição da borracha de pneu à pavimentação asfáltica, tanto sob os aspectos ambientais, como sob a ótica dos aspectos tecnológicos.

Este trabalho está estruturado em três partes fundamentais: Introdução, Desenvolvimento (constando de seis capítulos) e Conclusões.

O Capítulo 1 - Aspectos Gerais sobre Pneus inicia-se com o histórico, isto é, evolução da utilização de borracha natural e posteriormente borracha reciclada de pneus na construção de estradas; na sequência explica o que é o pneu, seus componentes, estrutura e o mercado nacional de pneumáticos.

O Capítulo 2 – Aspectos Gerais sobre o Asfalto aborda os antecedentes, patentes, mudanças nas técnicas de produção e consumo, o que são asfaltos e sua classificação.

O Capítulo 3 – Aspectos Ambientais comenta sobre os problemas associados à disposição de pneus em áreas ao ar livre, rios e depósitos de lixo. Ademais, menciona a legislação existente e o que significa o desafio da reciclagem, ou seja, as aplicações para pneus usados.

O Capítulo 4 - Os Processos de Incorporação de Borracha de Pneus em Misturas Asfálticas, descreve os principais processos adotados: o seco e o úmido.

O Capítulo 5 - As Aplicações do Concreto Asfáltico Modificado por Borracha de Pneus, trata das especificações, aplicações e estimativas de consumo de borracha de pneus.

O Capítulo 6- Aspectos Econômicos, apresenta dados de uma análise de viabilidade econômica sobre uma possível utilização de asfalto borracha em um trecho de rodovia a ser duplicada (BR-101, Sul).

É também mostrada uma análise comparativa do custo do ciclo de vida de dois trechos sequenciais de uma rodovia no Arizona nos Estados Unidos, um usando asfalto convencional e o outro asfalto borracha.

CAPÍTULO I

ASPECTOS GERAIS SOBRE PNEUS



1.1 - HISTÓRICO

A primeira patente segundo Zanzotto e Kennepohl (1996), em que se juntou material betuminoso com borracha natural para a construção rodoviária foi concedida à E.E. Cassel na Inglaterra em 1844. Entretanto, somente em 1901 é que começaram na França as aplicações práticas com asfalto modificado com a instalação da Société du Pavage en Asphalt Caoutchoute.

A primeira via em que se utilizou asfalto modificado com borracha, teve lugar em 1902, em Cannes na França.

Na década de 30 com o aparecimento dos primeiros polímeros sintéticos considerou-se a possibilidade de juntá-los às misturas asfálticas. Até então os processos de modificação empregavam quase que exclusivamente borracha natural. Em 1940 a Rubber Reclaiming Company nos Estados Unidos começou a comercializar borracha desvulcanizada reciclada, denominada Ramflex. (Salini, 2000).

A adição de borracha de pneu como material de pavimentação asfáltica teve um avanço tecnológico em meados de 1960 quando o engenheiro Charles McDonald desenvolveu um ligante modificado para asfalto usando borracha triturada, que foi chamado Overflex. Nos anos 70, a Arizona Refining Company (ARCO), criou um novo ligante que foi batizado de Arm-R-Shield.

Presentemente, ambos os sistemas são conhecidos como tecnologia McDonald (Bertollo, 2002).

Na Suécia, também nos anos 60, duas empresas desenvolveram um composto intitulado Rubit, em que a borracha era adicionada à mistura na forma de partículas pequenas em substituição de parte dos agregados nas misturas asfálticas. Na década de 70, este produto foi patenteado nos Estados Unidos com o nome de PlusRide (Salini, 2000).

Leis que regulamentam o uso de borracha de pneus em misturas asfálticas decorrentes da crescente inquietação da sociedade com os aspectos ambientais se constituem numa nova motivação para estudos sobre o tema com destaque para novas tecnologias.

1.2 - O QUE É O PNEU

O pneumático, abreviadamente denominado de pneu, é um útil e necessário invento que proporciona desempenho, economia e conforto à rodagem de veículos terrestres automotores e outros. Possui papel fundamental em nossa vida diária, tanto no transporte de passageiros quanto no de cargas.

É um tubo de borracha cheio de ar e ajustado ao aro da roda do veículo, tornando possível a tração do veículo e, ao mesmo tempo, absorvendo os choques com o solo sob o qual o veículo trafega (Andrietta, 2003).

O pneu é constituído basicamente por um grande número de componentes:

- Aço, tecido de náilon ou poliéster e fibra de vidro;

- Borracha natural, e sintética, incorporando vários tipos de polímeros;
- Reforçadores químicos, como carbono preto, sílica e resinas;
- Antidegradantes: ceras de parafina antioxidantes e inibidoras da ação do gás ozônio ;
- Promotores de adesão: sais de cobalto, banhos metálicos nos arames e resinas;
- Agentes de cura: aceleradores de cura, ativadores, enxofre;
- Produtos auxiliares no processamento dos pneus como óleos (Salini, 2000).

Esta composição visa dotá-lo das características necessárias ao seu desempenho e segurança. Um pneu de veículo de passeio típico, com uma massa inicial aproximada de 10kg quando precisa ser substituído, sua carcaça pesa algo em torno de 8,5kg, contendo a mesma quantidade de aço e lona.

1.3 - ESTRUTURA DO PNEU

Um pneu de automóvel é constituído de: Carcaça, Talões, Flancos, Cintura e Banda de Rodagem. Ver Figura 1

1.3.1 - Carcaça: parte resistente do pneu: deve resistir a pressão, peso e choques. Compõe-se de lona de poliéster, nylon ou aço. A carcaça retém o ar sob pressão que suporta o peso total do veículo. Os pneus radiais possuem ainda as cinturas que complementam sua resistência;

1.3.2 - Talões: constituem-se internamente de arames de aço de grande resistência, tendo por finalidade manter o pneu fixado ao aro da roda;

1.3.3 - Flancos: são as laterais da carcaça revestidas por uma mistura de borracha com alto grau de flexibilidade e alta resistência à fadiga;

1.3.4 - Cintura: compreende o feixe de cintas (lonas estabilizadoras) que são dimensionadas para suportar cargas em movimento. Sua função é garantir a área de contato necessária entre o pneu e o solo;

1.3.5 - Banda de rodagem: é a parte do pneu que fica em contato direto com o solo. Seus desenhos possuem partes cheias denominadas de biscoitos e parte vazias conhecidas como sulcos, e devem oferecer aderência, tração, estabilidade e segurança ao veículo.

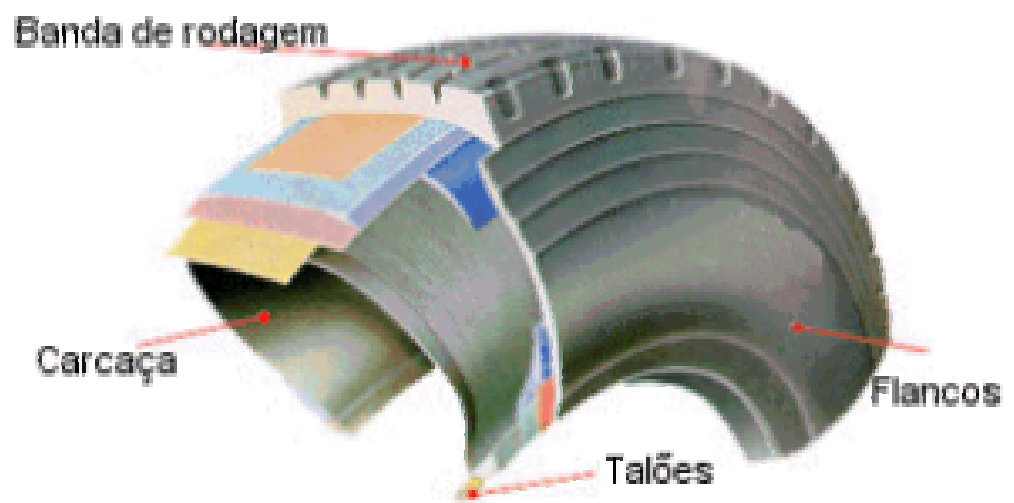


Figura 1 – Estrutura do Pneu

A principal diferença entre um pneu diagonal e um radial está em sua carcaça: o pneu diagonal (convencional) apresenta uma carcaça constituída de lonas têxteis cruzadas uma em relação à outra; a carcaça do pneu radial, por outro lado formada por uma ou mais lonas com cordonéis em paralelo e no sentido radial. Ver Figura 2

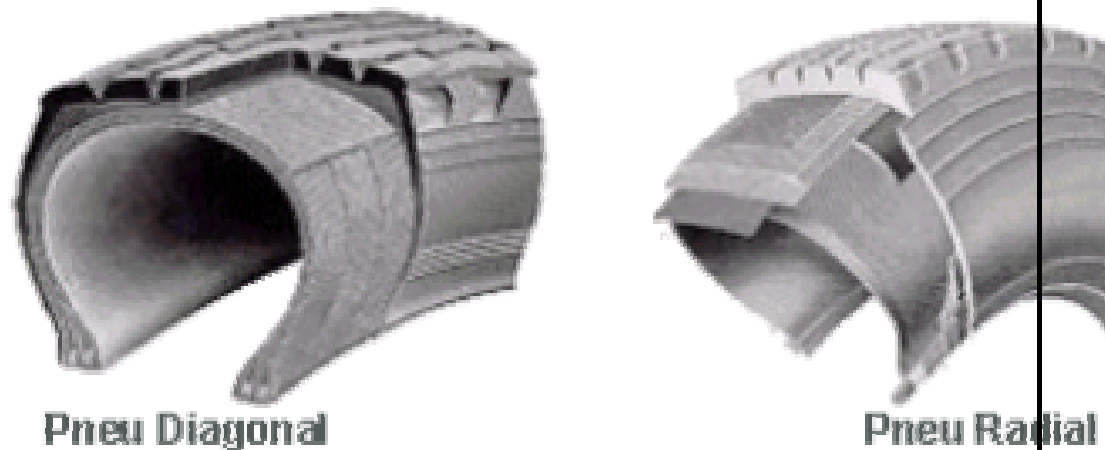


Figura 2

Em relação ao convencional, o radial apresenta as seguintes vantagens: maior durabilidade, melhor aderência, maior eficiência nas freadas e aceleradas e economia de combustível (Rodas e Pneus 2003).

1.4 - O MERCADO DE PNEUS

O crescimento da indústria automobilística no século XX fez com que o número de pneus descartados anualmente atingisse valores extremamente significativos. Estima-se que a produção mundial de pneus atinja um bilhão de unidades

Os principais fabricantes de pneus remontam suas origens aos pioneiros do século XIX: a inglesa Dunlop, posteriormente absorvida pela italiana Pirelli, a francesa Michelin, as norte-americanas Goodyear e Firestone, esta última hoje consociada com a japonesa Bridgestone (Andrietta, 2003).

Nos Estados Unidos são descartados anualmente 285 milhões de pneus, o equivalente a mais de 2 milhões de toneladas. A indústria brasileira de pneus com uma

atuação de mais de 60 anos no país, está entre as mais modernas do mundo.

A explicação para esse resultado é simples: o país tem uma das maiores frotas de veículos pesados do mundo. As pesquisas indicam que só de caminhões temos mais de 1,6 milhões de unidades e que nenhum modelo produzido sai da fábrica sem ter, no mínimo, seis pneus.

No Brasil são colocados no mercado aproximadamente 61 milhões de pneus por ano, sendo que cerca de 38 milhões são resultado da produção nacional e 23 milhões são pneus reaproveitados (ANIP, 2001)

As importações segundo o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social –BNDES são mais significativas em termos de pneus usados e recauchutados que visam atender um segmento de mercado que busca baixo preço. Presentemente, no Brasil são descartados cerca de 30 milhões de pneus anualmente.

A estimativa sobre a disposição final de pneus usados no Brasil está baseada na frota de veículos e na produção anual de pneus, já que não há monitoração por parte do Governo nem do setor privado.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GERAIS SOBRE O ASFALTO



2.1 - ANTECEDENTES

O asfalto é um dos materiais mais antigos utilizados pelo homem. Era empregado desde a construção de estradas até a vedação de barcos. O primeiro registro do uso do asfalto como material de construção de estradas é de 625 antes de Cristo na Babilônia, no reinado de Nabopolassar.

Sabe-se também que os gregos conheciam o asfalto e suas propriedades. A palavra asfalto vem do grego “asphaltos” que quer dizer seguro. Os romanos mudaram a palavra para “asphaltus” e usaram essa substância para vedação de banheiras, reservatórios e aquedutos.

Séculos mais tarde, os europeus ao descobrirem o Novo Mundo, encontraram depósitos naturais de asfalto. Em 1595, Sir Walter Raleigh descreve a existência de um lago de asfalto na ilha de Trinidad, próximo a costa da Venezuela. Ele usou este asfalto para vedar o casco de seus navios.

Em que pese esses usos iniciais, muitos anos se passaram até que os construtores europeus e norte-americanos utilizassem o asfalto como material de pavimentação. Coube a John Metcalf e John McAdam desenvolverem bons métodos de construção.(Napa, 2003)

2.2 - PATENTES

Ao perceberem as vantagens do uso do asfalto, os construtores, segundo a Napa, trataram de assegurar que suas descobertas sobre as propriedades do material fossem reconhecidas. O primeiro pedido de patente ocorreu em 1871 por meio de Nathan B. Abbot de Nova Iorque.

Em 1900, Frederick Warren solicitou a patente do pavimento "Bitulithic" uma mistura de betume e agregado. Outros nomes comerciais para misturas asfálticas foram: Wilite, Romanite, Imperial, Endurite e Macasphalt. Algumas por serem inovadoras tecnicamente, foram um sucesso. A patente do Bitulithic expirou em 1920.

2.3 - MUDANÇAS NAS TÉCNICAS DE PRODUÇÃO E CONSUMO

Até 1900, quase todo asfalto utilizado nos Estados Unidos, vinha de fontes naturais como os lagos de Trinidad e Bermudez, este último na Venezuela. O asfalto derivado de petróleo apareceu em meados de 1870 e lentamente foi sendo aceito. Inicialmente era empregado como aditivo para melhorar o manuseio e a colocação do asfalto natural.

Por volta de 1907, a produção de asfalto derivado de petróleo, tinha suplantado a de asfalto natural. A companhia Cummer inaugurou a primeira central de asfalto aquecido nos Estados Unidos em 1870.

No fim do século XIX em ambos os lados do Atlântico, construtores desenvolveram equipamentos para produção de misturas de asfalto. A primeira usina de asfalto contendo praticamente todos os componentes que hoje conhecemos foi construída em 1901 por Warren Brothers em Cambridge, Massachussets nos Estados Unidos.

A tendência na melhoria da qualidade do asfalto prosseguiu particularmente, nos anos 50 e 60 do século XX. Atualmente, a versatilidade no uso do asfalto tem aumentado o seu uso inclusive para outras finalidades que não pavimentação.(Napa, 2003)

2.4 - O QUE SÃO ASFALTOS?

São materiais aglutinantes, de cor escura, sólidos, semi-sólidos ou líquidos, obtidos por um processo de destilação (Petrobrás, 2003). São formados basicamente de quatro frações químicas: saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos (SARA), sendo que as três primeiras frações constituem a porção maltênica e a última denomina-se porção asfaltênica.

Mudanças na proporção entre estas frações conduz a asfaltos com diferentes composições químicas (Specht et al. , 2002)

2.5 - CLASSIFICAÇÃO

De acordo com a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto (Abeda, 2003), os asfaltos podem ser classificados em dois grupos:

2.5.1 - Asfalto para pavimentação

- a) Cimentos asfálticos de petróleo (CAP);
- b) Asfaltos diluídos de petróleo;
- c) Emulsões asfálticas;
- d) Asfaltos modificados;

1.5.2 - Asfaltos industriais

- a) Asfaltos oxidados

b) Asfaltos modificados para impermeabilização

O cimento asfáltico de petróleo é um material adequado para trabalhos de pavimentação, pois além de suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes apresenta características de flexibilidade e durabilidade. São encontrados os seguintes tipos: CAP 7, CAP 20, CAP 40, CAP 35/40, CAP 85/100 e CAP 150/200.(Greca Asfaltos, 2003)

Considerando a infra-estrutura viária que serve a qualquer tipo de tráfego e independente das condições climáticas, o asfalto tem a preferência no Brasil e no mundo para a construção e manutenção das estradas pavimentadas.

Nos Estados Unidos, país que possui a maior rede pavimentada do mundo (3,65 milhões de quilômetros), 94% são em asfalto.

Dos asfaltos fabricados no Brasil, cerca de 95% destinam-se a trabalhos de pavimentação, e uma pequena parcela a aplicações industriais, como impermeabilizantes e isolantes. As refinarias do país produzem cerca de 1,4 milhões de toneladas por ano. O asfalto borracha pertence ao grupo dos asfaltos modificados.

Grandes volumes de resíduos industriais de difícil degradação como escórias de aciaria, plásticos, vidros, cinzas de carvão e borracha de pneus inservíveis podem ter um destino adequado se adicionados ao asfalto usado em pavimentação.

Além de constituir um bom negócio para todos o asfalto é um produto largamente reciclável (Abeda, 2003).

CAPÍTULO III

ASPECTOS AMBIENTAIS



Quando abandonados em locais inadequados, os pneus servem como local para procriação de mosquitos e outros vetores de doenças e representam um risco constante de incêndio, que contamina o lençol freático. Além disso, a disposição de pneus em aterros sanitários é problemática, pois os pneus dificultam a compactação, reduzindo significativamente a vida útil dos aterros. Por outro lado, a trituração, que resolveria o problema da compactação, é um processo caro.

A maior parte dos pneus descartados nos Estados Unidos (cerca de 65% do total, o que equivale a 188 milhões de pneus por ano) é disposta de forma inadequada, gerando graves problemas. Estima-se que haja, nos Estados Unidos, um passivo ambiental de 2 a 3 bilhões de pneus (Heitzman, 1992). No Brasil, estima-se que pelo menos 50% dos pneus produzidos anualmente estão sendo descartados e dispostos em locais inadequados e que o passivo ambiental seja superior a 100 milhões de pneus (ANIP, 2001).

Na década de 80, nos Estados Unidos, grandes incêndios de pneus causaram a contaminação do ar, da água e do solo. Dada a magnitude do problema, surgiu o interesse

no desenvolvimento de pesquisas, visando a reutilização de borracha de pneus em obras de engenharia. Em 1991, a Lei sobre a Eficiência do Transporte Intermodal de Superfície (Public Law 102-240-ISTEA, 1991) obrigou os Departamentos de Transportes Estaduais (DOT's) e a Agência de Proteção Ambiental (EPA), em cooperação, a desenvolverem estudos para utilizar pneus na construção de pavimentos asfálticos. Dessa forma, os estados americanos começaram a construir pavimentos asfálticos com borracha de pneus descartados moída: em 1994, cerca de 5% de pavimentos asfálticos, foram construídos dessa forma, em 1995, 10%; em 1996, 15% e a partir de 1997, 20%.

Conforme informação da ANBio – Associação Nacional de Biossegurança, no ano passado (2002), a indústria brasileira de pneumáticos conseguiu superar a meta de reciclagem de um pneu usado para cada quatro pneus produzidos ou importados, estabelecida pela Resolução n.º 258/99 do CONAMA – Conselho Nacional do Meio ambiente.

O esforço dos produtores envolveu toda a rede de revenda de pneus no País, algo em torno de 4.000 lojas que recebem de volta pneus usados quando fazem a troca por novos. O material é levado para “ecopontos” espalhados por quase todos os Estados. Depois vai para centros de trituração e, após para as usinas de cimento, em cerca de dez fornos licenciados.

No processo, envolvem-se algumas Prefeituras – a do Rio de Janeiro, por exemplo, recolhe os pneus em caçambas espalhadas pela cidade – e governos – como é o caso de São Paulo, que já mandou para o centro de trituração de Jundiaí (interior do

Estado), quase 70 mil toneladas de pneus velhos retirados do Rio Tietê, pela obra de aprofundamento de sua calha.

Pela Resolução do CONAMA, a meta de destinação neste ano duplica; seria de um pneu para cada dois produzidos ou importados, ou cerca de 180 mil toneladas. Em 2004, a meta é de um para um e em 2005, passa a ser reciclar cinco pneus inservíveis para cada quatro produzidos. Mas para isso, é necessário fortalecer as duas pontas do processo: a entrega, por parte dos consumidores dos pneus velhos aos revendedores e o desenvolvimento e ampliação das possibilidades economicamente viáveis de reaproveitamento do material recolhido.

3.1 – LEGISLAÇÃO

Foi aprovada, em 26 de agosto de 1999, a Resolução nº 258 do CONAMA, que instituiu a responsabilidade, ao produtor e importador, pelo ciclo total da mercadoria. A partir de janeiro de 2002, fabricantes e importadoras de pneus serão obrigados a coletar e dar destino final de forma ambientalmente correta para os produtos que colocam no mercado. Pela proposta, o IBAMA ficará responsável pela aplicação da Resolução, podendo punir os infratores com base na Lei de Crimes Ambientais. Inicialmente, para quatro pneus novos fabricados no Brasil ou importados, os fabricantes deverão reciclar ou reutilizar um pneu inservível.

A Senadora Marina Silva (PT) – Ministra do Meio Ambiente do Governo do Presidente Luiz Inácio Lula da Silva, quer proibir a importação de pneus usados. O projeto pretende minorar o acúmulo de pneus

largados em terrenos baldios, rios, córregos, lixões e aterros sanitários, com conseqüências nocivas ao meio ambiente. Os EUA e alguns países da Ásia vendem parte dos pneumáticos usados ao Brasil para “reciclagem”. A vida útil desses pneus é muito curta. O governo editou normas proibindo sua comercialização, mas inúmeras contestações judiciais têm garantido essa verdadeira exportação de dejetos industriais dos países desenvolvidos para cá.

Muitos países têm legislação para direcionar seus departamentos de transporte a investigar a possibilidade de utilização de materiais recicláveis em obras de pavimentação. O governo americano, em especial, tem incentivado a incorporação de borracha modificada (vulcanizada) nas misturas asfálticas. A Seção 1.038 da Lei sobre a Eficiência do Transporte Intermodal de Superfície de 1991 (*Intermodal Surface Transportation Efficiency Act – ISTEA*), garante benefícios fiscais aos Estados que utilizam borracha de pneus nas misturas asfálticas e prevê punições aos Estados que não obedecerem. Em alguns Estados como a Flórida, Califórnia e Arizona, a reciclagem de pneus para pavimentação já é uma realidade (Carlson e Zhu, 1999).

No Brasil ainda não há uma Lei semelhante que obrigue a utilização de uma porcentagem mínima de pneus descartados em obras de pavimentação. Porém, já ocorreram avanços com a Resolução n.º 258/99 do CONAMA.

Independente do avanço da legislação brasileira, algumas empresas já estão trabalhando no sentido de transformar o que sempre foi rejeitado em fonte de renda. Um exemplo é a reutilização de pneus velhos e

novos que não passaram no controle de qualidade das indústrias pela Borcol, Indústria de Borracha sediada em Sorocaba - SP, que transforma cerca de 5,5 milhões de carcaças por ano em 8,4 milhões de peças entre capachos, tapetes para banheiros e automóveis, pisos antiderrapantes entre outros.

O Departamento de Meio Ambiente e Uso do Solo da Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP) e do Centro das Indústrias do Estado de São Paulo (CIESP) promovem, pelo menos uma vez por mês, seminários técnicos que orientam as empresas sobre as tecnologias e equipamentos disponíveis, visando a recuperação de produtos químicos, energia, água, combustível etc. Alguns municípios como Santa Maria/RS, Porto Alegre/RS, Rio de Janeiro/RJ, Sorocaba/SP, São Paulo/SP, Piracicaba/SP, Apucarana/PR dentre outros, tentando minimizar o problema utilizam os pneus descartados em obras de drenagem e na fabricação de tapetes de automóveis, solas de sapato, tiras para estofados etc (CEMPRE, 1998).

3.2 – O DESAFIO DA RECLICAGEM: USO PARA PNEUS USADOS

O revestimento betuminoso é um acabamento vital em estradas importantes e com tráfego intenso, além de ser indispensável em obras urbanas e aeródromos. Na pavimentação temos grandes extensões de estradas a serem pavimentadas com escassos recursos financeiros. A utilização de borracha reciclada de pneus usados é uma forma de viabilizar a implantação de novas rodovias, bem como a restauração das já existentes.

A química contida na borracha retarda a oxidação do asfalto, prevenindo-o de se tornar quebradiço. Por causa da maior flexibilidade, o asfalto emborrachado resiste e reduz a quantidade de rachaduras. Rachaduras estas que permitem a infiltração de água que age nas camadas inferiores da via comprometendo a base, criando buracos e, finalmente, deteriorando a superfície.

O reaproveitamento da borracha de pneus, com o objetivo de incorporá-la ao pavimento asfáltico possui dentro da infraestrutura viária uma posição de destaque. Dentre as vantagens da reciclagem da borracha de pneus pode-se destacar:

- a) A utilização dos pneus usados ajuda a combater a poluição ambiental;
- b) A “carcaça” de pneus é de fácil transporte;
- c) Seu manuseio não oferece riscos aos operadores;
- d) Seu custo resume-se ao transporte do local encontrado até o ponto de utilização;
- e) A adição de borracha à massa asfáltica melhora suas características permitindo que com a metade da espessura obtenha-se a mesma resistência;
- f) O pneu possui dimensões geométricas padronizadas, o que facilita o desenvolvimento de equipamentos de desmonte e trituração;
- g) Por ter a mesma origem do asfalto (petróleo), a borracha de pneu não apresenta problemas de compatibilidade

química com o pavimento betuminoso, nem causará problemas de corrosão nos equipamentos rodoviários;

- h) Redução do envelhecimento: a presença de antioxidantes e carbono na borracha dos pneus que é incorporada ao cimento asfáltico proporciona uma redução do envelhecimento por oxidação;
- i) Aumento da flexibilidade: misturas asfálticas com o ligante asfalto-borracha são mais flexíveis que as misturas asfálticas convencionais (Stephens, 1982; Takallou e Hicks, 1992), em virtude da maior concentração de elastômeros na borracha de pneus;
- j) Aumento do Ponto de Amolecimento: a adição de borracha faz com que o ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha aumente a resistência ao acúmulo de deformação permanente nas trilhas de rodas (Salter e Mat, 1990; Oda, 2000)
- k) Redução da Susceptibilidade Térmica: o uso de um ligante asfalto-borracha proporciona misturas asfálticas mais resistentes às variações de temperatura, ou seja, tanto o desempenho a baixas quanto a altas temperaturas são melhores quando comparado com pavimentos construídos com ligante asfáltico convencional (Heiztman, 1992; Ruth *et al.*, 1997).

Uma outra vantagem é a redução do ruído de tráfego pelo uso do asfalto emborrachado. O Relatório Sobre a Redução de Ruído de Tráfego pelo Uso de asfalto emborrachado, no Condado de Sacramento na Califórnia (EUA), por exemplo, mostra uma

diminuição considerável do nível de ruído (3 a 5 decibéis).

O impacto de uma diminuição de 50% no nível de ruído (3 a 5 db) representa uma redução do volume de tráfego à metade, ou 25% de redução na velocidade, ou mesmo dobrar a distância da fonte de ruído (*Rubber Pavement Association – RPA*).

Essa redução também pode diminuir os custos, se considerarmos a necessidade da obrigação legal, em alguns países, da construção de paredes contra ruídos, que custam em torno de U\$ 600 a U\$ 1200 por metro.

A comunidade científica, nos últimos anos, tem desenvolvido pesquisas envolvendo a reciclagem e o reaproveitamento de pneus. Dentre as possibilidades estudadas estão:

- a) Fonte Energética: existem estudos e já tem sido utilizado em indústrias cimenteiras um grande volume de pneus como fonte de energia calorífica. Um dos inconvenientes é a instalação de sistemas para amenizar o problema da emissão de resíduos para a atmosfera. Em alguns Estados americanos, a geração de energia em termelétricas tem utilizado como combustível pneu velho.
- b) Concreto de baixo desempenho: *Fedroff et al.* (1996) desenvolveram uma pesquisa sobre a viabilidade da aplicação de farelos de pneus em concreto. Os resultados mostraram uma importante redução nas características de qualidade do concreto denominado “rubcrete”, entretanto, sugerem a utilização deste tipo de material para aplicação em

pavimentação como reforço do sub-leito ou camadas de pouca solicitação estrutural. A aplicação do “rubcrete” pode ter maior potencial na construção civil como isolante térmico ou acústico.

- c) Pavimentação: uma das áreas mais estudadas e que tem maior potencial de utilização, devido a dois fatores – a utilização de um grande volume de pneumáticos usados e a melhoria das características dos ligantes asfálticos com a adição de farelo de pneu.
- d) Muros de gravidade e obras de contenção: existem estudos de muros de contenção utilizando pneus velhos amarrados uns aos outros através de arame galvanizado e preenchidos com solo do local ou material pétreo. São estruturas semelhantes aos gabiões, no entanto as “formas” são um material praticamente sem custo. Apesar da ótima destinação dada aos pneus nesse tipo de solução, a quantidade de obras de contenção é insignificante perante o volume de resíduo gerado.
- e) Estruturas de absorção de energia ou barreiras de inércia: montando estruturas de pneus e utilizando-os nas laterais de rodovias para amortecer o impacto em caso de acidente. Esta utilização é comum em autódromos e pistas de corrida.
- f) Drenagem: há iniciativas, inclusive no Estado do Rio Grande do Sul, de se utilizar módulos compostos por vários pneus para servir como tubos de drenagem. Esta experiência tem tido especial sucesso em áreas rurais.

- g) Cobertura de aterros sanitários: o pó ou farelo de pneus é utilizado como cobertura diária de aterros sanitários para evitar a ploriferação de roedores e insetos.
- h) Extração de óleos voláteis: em processo de aquecimento (acima de 1000 °C) sob condições controladas pode ser recuperado o óleo e alguns gases existentes na borracha. Este processo conhecido como pirólise tem sido testado no Brasil (Estado do Paraná), entretanto sua viabilidade ainda é questionável.
- i) Absorção de óleos: utilizado em caso de derramamento de óleo ou produtos químicos semelhantes ou para filtragem e absorção de resíduos líquidos.
- j) Impermeabilização: uma mistura semelhante ao *asphalt-rubber* tem sido utilizada para impermeabilização de aterros sanitários, resíduos de extração de minérios e solos contaminados (Roberts *et al.*, 1989).

Dados de Estados americanos (ver tabelas 1, 2 e 3) apresentam como maior potencial de utilização aplicação do pó em pavimentação e a utilização como combustível em cimenteiras.

Tabela 1 – Uso de pneus inservíveis no Arizona em 1998(Adaptado por: Carlson e Zhu, 1999)

Utilização	Quantidades (unidades)
Cimenteiras / geração de energia	0
Exportação ou cobertura de aterros	1 milhão

sanitários	
Reuso / retrabalho em outros produtos	0,4 milhão
Aplicações em pavimentação	2,6 milhões

Tabela 2 – Uso de pneus inservíveis na Califórnia em 1998(Adaptado por: Carlson e Zhu, 1999)

Utilização	Quantidades (unidades)
Cimenteiras	4,9 milhões
Geração de energia	3,5 milhões
Reuso / retrabalho em outros produtos	4,3 milhões
Aplicações em pavimentação	2,7 milhões

Tabela 3 – Uso de pneus inservíveis na Flórida em 1998(Adaptado por: Carlson e Zhu, 1999)

Utilização	Quantidades (unidades)
Cimenteiras / Geração de energia	9,1 milhões
Reuso / retrabalho em outros produtos	6,3 milhões
Aplicações em pavimentação	3,0 milhões

Para termos uma idéia do volume de pneus utilizados em pavimentação, analogamente, se fôssemos restaurar 100 km de rodovia, nas condições nacionais, 3,5 m cada pista e um reforço com 7,5 cm de CBUQ com ligante modificado de borracha, (densidade da mistura asfáltica igual a 24,2 kN/m³ e quantidade de ligante 5% com 20% de CRM), utilizaríamos 785 kg de farelo a cada 100 m, ou 785 t deste material nos 100

km. Supondo pneus de 10 kg cada (dos quais 85% são borracha), utilizaríamos a cada 100 m 150 pneus e nos 100 km 150.000 unidades de pneumáticos inservíveis.

CAPÍTULO IV

OS ASPECTOS DE INSCRIÇÃO DE BORRACHA DE PNEUS EM MISTURAS ASFÁLTICAS



Em 1963, Charles H. McDonald, considerado o pai do sistema asfalto-borracha (asphalt-rubber) nos Estados Unidos, trabalhando para a 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 (de 0,6 a 1,2 mm), misturados a uma temperatura de 190° C durante 20 minutos, para ser utilizado em remendos. 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). A primeira aplicação foi feita em uma rua na cidade de Phoenix, onde pôde-se verificar que, após 6 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.

Os revestimentos asfálticos com borracha são normalmente produzidos com restos ou resíduos de borracha e de acordo com várias técnicas, incluindo o processo seco e úmido.

Os pneus são cortados e triturados, em várias operações de separação dos diferentes materiais, que permitem a recuperação dos materiais, obtendo-se borracha pulverizada ou granulada, que irá ter diversas aplicações, como: em misturas asfálticas, em revestimentos de quadras e pistas de esportes, na fabricação de tapetes automotivos, adesivos, etc.

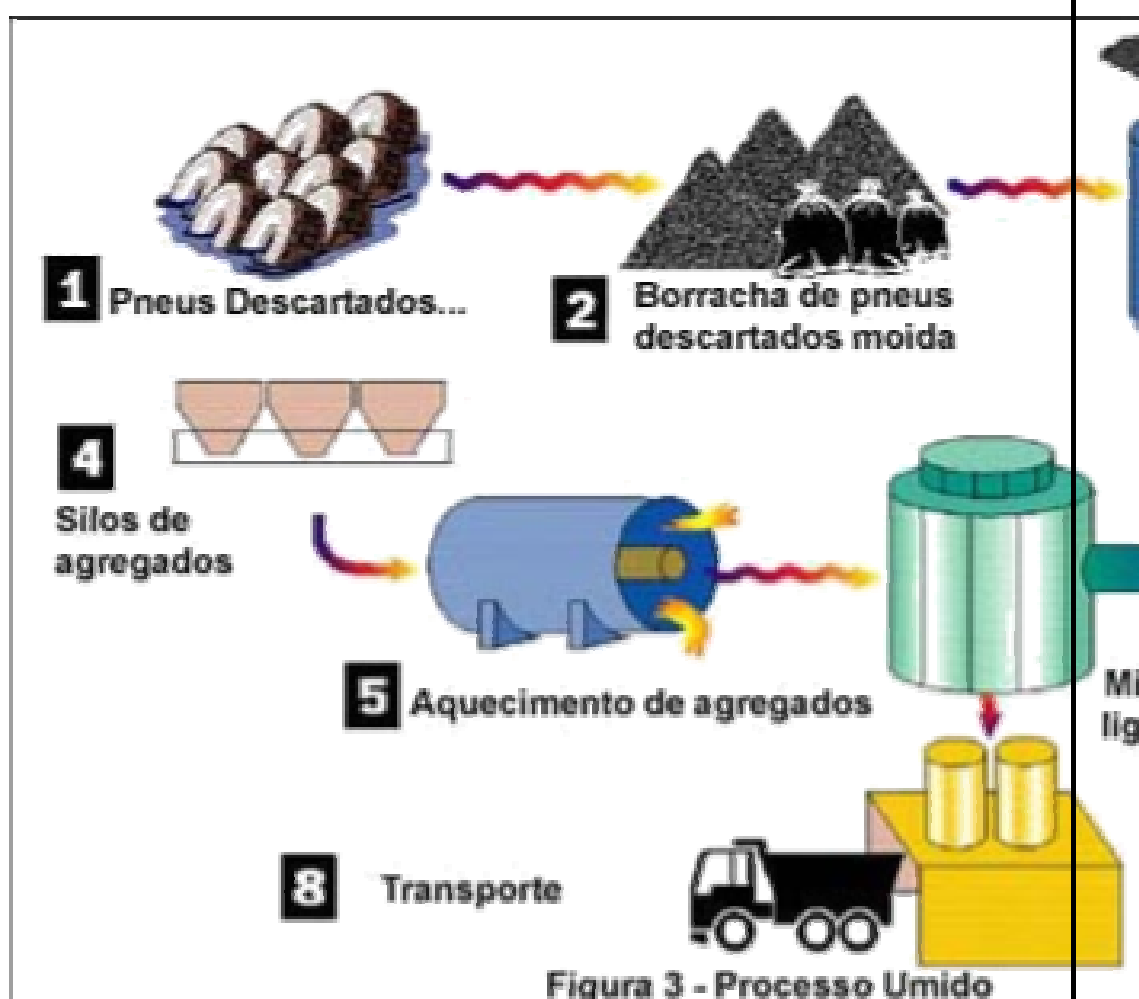
Observa-se que quando são analisados os vários mercados para utilização de borracha de pneus inservíveis, somente dois apresentam potencial para utilização de números significativos de pneus: o energético e de misturas asfálticas. Segundo Heitzman (1992) e Zanzotto e Kennepohl (1996), cada tonelada de mistura asfáltica pode incorporar a borracha de dois a seis pneus. Nas misturas asfálticas, existem dois processos de incorporação dos pneus: úmido e seco.

4.1 - PROCESSO ÚMIDO

No processo úmido (wet process) são adicionadas partículas finas de borracha ao cimento asfáltico, produzindo um novo tipo de ligante denominado “asfalto-borracha”. Usualmente são empregados teores de borracha que variam de 5% a 25% do peso do ligante.

A temperatura em que a mistura é feita, o tempo em que esta temperatura se mantém, se há agitação mecânica e os componentes desta, são fatores que vão influenciar a combinação.

O processo McDonald e o produto Arm-R-Shield serviram de base para as aplicações inicialmente efetuadas do processo úmido.



4.2 - PROCESSO SECO

Já no processo seco (dry process), partículas maiores de borracha substituem parte dos agregados pétreos. Após a adição do ligante, formam um produto denominado

“concreto asfáltico modificado com adição de borracha”.

O processo seco como é atualmente utilizado foi introduzido nos Estados Unidos com o nome de PlusRide. A borracha granulada representa de 1% a 3% do peso total da mistura asfáltica, e os granulos de borracha variam de 2,0 mm a 6,0 mm.

CAPÍTULO V

APLICAÇÕES DO CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO POR BORRACHA DE PNEUS



A estrutura em camadas assentada sobre uma fundação, denominada de subleito recebe a designação de pavimento. As camadas mais próximas da superfície geralmente têm melhores características e custos mais elevados. A camada mais importante em termos da estrutura é a base. Sobre ela, para suportar os efeitos destrutivos do tráfego e das intempéries, está o revestimento ou camada de rolamento. Abaixo da base, como transição ao subleito, pode haver uma sub-base e/ou um reforço do subleito.

O pavimento tem como função suportar o tráfego e fornecer aos usuários segurança, conforto e economia. Essa função está intimamente relacionada com o estado da superfície de rolamento.

No que diz respeito aos pavimentos flexíveis, o revestimento, geralmente, é constituído pela combinação de ligante asfáltico e agregado mineral (mistura asfáltica), podendo conter ainda material de preenchimento (filler mineral) e aditivos para melhorar suas propriedades físicas, mecânicas e químicas, aumentando a resistência à formação de defeitos. São adicionados aos cimentos asfálticos produtos como agentes melhoradores de adesividade (DOPE), agentes rejuvenescedores, polímeros (SBR, SBS, EVA, etc) e, particularmente, borracha de pneus moída.

O ligante asfalto-borracha tem sido aplicado em vários serviços de pavimentação, de selagem de trincas até em concreto asfáltico usinado a quente. Apesar da ocorrência de defeitos na superfície de rolamento, de uma maneira geral os resultados tem sido positivos. Os principais defeitos relatados são a exsudação (assunção do ligante betuminoso para a superfície do pavimento, gerando área escorregadia com grande redução de segurança do tráfego) e as trincas por contração de origem térmica, associados, principalmente, a dosagem inadequada do teor de asfalto-borracha (Estakhri et al., 1992).

Quando comparado com o ligante convencional, pode-se verificar que a quantidade de asfalto-borracha necessária para uma determinada mistura é maior, o que justifica o problema de exsudação, mas ao

mesmo tempo proporciona uma maior durabilidade a mistura asfáltica.

Inicialmente, o ligante asfalto-borracha foi desenvolvido para ser usado em atividades de manutenção, reabilitação e para tentar prolongar a vida de um pavimento. As primeiras observações das aplicações em campo mostraram que o asfalto-borracha retardava a formação de trincas por reflexão e por fadiga (Morris e McDonald, 1976).

Outra aplicação foi como selante de trincas existentes (Coetzee e Monismith, 1979). Desde então, as aplicações de asfalto-borracha não estão restritas as atividades de reabilitação (remendo, selante de trincas e juntas), mas também tem sido utilizados em tratamento superficial (SAM), transição entre pavimento existente e camada de reforço (SAMI) e revestimento de concreto asfáltico.

5.1 – APLICAÇÕES

São muitas as possibilidades de utilização do asfalto-borracha na engenharia rodoviária, praticamente as mesmas dos cimentos asfálticos convencionais e modificados com polímeros.

Na sequência serão abordadas as principais formas de aplicação do ligante asfalto-borracha:

5.1.1 - Concreto Asfáltico Usinado a Quente:

As principais características das camadas de rolamento em pavimentos flexíveis são de oferecer baixa deformabilidade (limites aceitáveis, de acordo com a estrutura do pavimento), oferecer resistência ao carregamento e as condições ambientais,

alem de proporcionar conforto de rolamento e de serem impermeáveis (exceto camadas porosas de atrito).

O uso do ligante asfalto-borracha em misturas asfálticas de graduação densa, em substituição ao ligante asfáltico convencional, reduz o acumulo de deformação permanente nas trilhas de roda, as trincas por contração de origem térmica. Segundo a tecnologia inicialmente proposta por McDonald (Baker Rubber Inc., 1988), o teor de borracha deve ser no mínimo de 15% do peso total de ligante e a granulometria da borracha deve atender os valores recomendados na Tabela 4.

Tabela 4 – Granulometria da borracha recomendada para misturas asfálticas de graduação densa

PEN EIRA	% Q U E P A S S A
Nº 10	1 0 0
Nº 16	9 8 — 1 0 0

N° 30	7 0 — 1 0 0
N° 50	1 0 — 4 0
N° 200	0 — 6

No Brasil, os projetos de misturas asfálticas são feitos de acordo com a metodologia Marshall. O Método Marshall foi desenvolvido na década de 40, nos Estados Unidos e é baseado na estabilidade que a mistura apresenta, além da densidade e volume de vazios (DNER – 1994, Hunter – 1994).

A principal diferença entre a produção de uma mistura asfáltica com ligante asfalto-borracha e uma mistura convencional é a pre-mistura (reação da borracha com o ligante asfáltico) para produzir o ligante asfalto-borracha. A reação é realizada em caminhões separados e/ou tanques. Quando a borracha é adicionada ao asfalto, a temperatura do ligante asfáltico deve estar entre 175 e 200°C. O ligante e a borracha são colocados e misturados em um misturador e então bombeados para o tanque de armazenamento para reação. O tanque de reação tem um

sistema mecânico que mantém agitação constante, mantendo a mistura dispersa. A temperatura deve ser mantida entre 160 e 190°C durante o tempo de reação, que deve ser no mínimo 30 minutos. A temperatura de lançamento é geralmente mais alta e a compactação deve ser realizada enquanto o material esta quente, pois a viscosidade do ligante asfalto-borracha aumenta rapidamente.

Não devem ser utilizados rolos pneumáticos na compactação da camada.

5.1.2 - Concreto Asfáltico Poroso:

O uso de concreto asfáltico poroso ou camada asfáltica drenante em rodovias tem sido cada vez mais utilizado principalmente em países da Europa. As vantagens deste material são evidentes: redução ou inexistência do spray e da aquaplanagem, melhoria da visibilidade noturna (redução do efeito espelho noturno), redução do nível de ruído e aumento da aderência pneu/pavimento. Normalmente o volume de vazios varia entre 18 a 24%, para tanto é necessário se utilizar um agregado com granulometria mais uniforme do que os utilizados em CBUQ.

Devido ao grande volume de vazios da mistura e do baixo percentual de ligantes utilizados, ligantes asfálticos com resistência a oxidação e baixa suscetibilidade térmica são requeridos para a manutenção das características de rigidez, de resistência à fadiga e de desagregação superficial das camadas porosas de atrito.

Acredita-se que os ligantes modificados com borracha, quando utilizados em camada porosa, possibilitam uma cobertura mais uniforme do agregado e pó, tornando-os mais

resistentes a intempéries, aumentando assim, a vida do pavimento.

Na Bélgica, 60% dos pavimentos construídos com camadas de concreto asfáltico poroso usam ligantes modificados com borracha reciclada.

No Brasil, a tecnologia desenvolvida pela Ipiranga Asfaltos, utiliza a camada porosa como uma "esponja de asfalto", que auxilia na prevenção de enchentes nas áreas urbanas e, ao mesmo tempo, protege o meio ambiente. Ao lado de todo o meio-fio, são instalados drenos, e, a cada intervalos pré-definidos, são abertos poços. Dessa maneira, a água da chuva é absorvida pelo asfalto poroso, percorre os drenos e é escoada para os poços. Com o pavimento esponjoso, a água leva mais tempo para chegar a saída e, conseqüentemente, ajuda a conter as enchentes.

A técnica foi utilizada pioneiramente em São Bernardo do Campo, na região metropolitana de São Paulo, com aprovação da CETESB, em bairros que circundam a represa Billings, tendo em vista que as áreas de mananciais não podem ser asfaltadas, devido ao prejuízo causado ao meio ambiente.

5.1.3 - Selagem de trincas e juntas:

A presença de água nas camadas de base do pavimento representa, na maioria das vezes, a perda da capacidade de carga e ruptura do mesmo. A entrada d'água pode acontecer de varias maneiras: falta de manutenção ou drenagem insuficiente, capilaridade e infiltração por trincas no revestimento betuminoso. A selagem de trincas consiste em um processo de

manutenção do pavimento, o qual pode manter sua integridade estrutural, e não tem função de reforçar a estrutura ou corrigir irregularidades.

Segundo Estakhri et al. (1992), o ligante asfalto-borracha é um dos melhores selantes de trincas existentes, tanto de pavimentos asfálticos como de pavimentos de concreto de cimento Pórtland, sendo recomendado fazer a selagem com auxílio de um aplicador manual.

As trincas alteram seu espaçamento conforme as variações térmicas, de umidade e as solicitações do tráfego. Os selantes convencionais de alta viscosidade geralmente possuem pouca aderência com as paredes da trinca e são arrancados pela ação do tráfego. Já os selantes de baixa viscosidade, apesar de possuírem boa interação com as paredes das trincas, são muito sensíveis às variações térmicas e podem escorrer para fora das trincas ou aderir aos pneus dos veículos.

Para que se proceda a manutenção das trincas do revestimento, alguns critérios devem ser observados, não se recomenda a selagem nas seguintes condições:

- 1 - abertura de fissuras menores que 3 mm,
- 2 - fendilhamento em forma de mapa (couro de jacaré),
- 3 - fissuração severa onde já houve o comprometimento do pavimento,
- 4 - pavimentos com camada asfáltica muito delgada ou rodovias com baixo volume de tráfego.

A adequada selagem das juntas entre placas de concreto é fundamental para a manutenção da serventia dos pavimentos de concreto cimento, evitando a entrada de água e bombeamento dos finos das camadas de

base e sub-base. Devido ao melhoramento das características de envelhecimento e conseqüentemente a manutenção da elasticidade com o passar do tempo, uma das utilizações do asfalto-borracha é a selagem das referidas juntas, aumentando o tempo entre as manutenções.

Comparando-se a vida útil de selantes com e sem asfalto-borracha, verifica-se que o selante com asfalto-borracha dura cerca de 3 vezes mais que o sem asfalto-borracha. Serviços executados com asfalto-borracha apresentam um custo aproximadamente 50% maior do que os serviços executados com ligantes sem borracha. Apesar dessa diferença no custo, quando analisados em conjunto, custo e vida útil, pode-se verificar que serviços com asfalto-borracha são mais vantajosos.

5.1.4 - Camada anti-reflexão de trincas:

O fenômeno do trincamento tem sido bastante estudado devido a sua relevância no desempenho de pavimentos. A formação das trincas em pavimentos novos é normalmente conseqüência da fadiga ou da retração térmica nos revestimentos asfálticos.

Sua ocorrência esta associada à incapacidade que as misturas asfálticas convencionais tem de suportar as elevadas concentrações de tensões e as deformações a que são submetidas na região do entorno da extremidade das trincas subjacentes, quando da passagem de uma carga de roda ou de movimentações de natureza térmica das camadas.

A reflexão de trincas pode ser reduzida através das seguintes alternativas:

- reciclagem do revestimento trincado antes do recapeamento, com a finalidade de eliminar as trincas existentes,
- mistura asfáltica da camada de recapeamento projetada com asfalto de baixa viscosidade,
- aumento da espessura da camada de recapeamento, de modo a atrasar a ascensão da trinca,
- atrasar o início do trincamento na face inferior da camada de recapeamento, através da construção de camada intermediária com característica específica.

O primeiro uso de ligantes modificados com borracha foi em camadas anti-reflexão de trincas, com dispositivos colocados no interior ou na base da camada asfáltica de reforço para retardar a reflexão de trincas, denominados SAM (Stress Absorbing Membrane) e SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer).

SAM (Stress Absorbing Membrane), trata-se de um "tratamento superficial" com asfalto-borracha, geralmente usado para prevenir e/ou retardar a formação de trincas por reflexão em pavimentos asfálticos. Consiste em distribuir uma camada de ligante asfalto-borracha (com cerca de 20% de borracha) sobre a superfície do pavimento existente, seguida de uma camada de agregados uniformes, espalhados sobre o ligante. A espessura de asfalto-borracha depende da granulometria do agregado, variando de 6 a 9mm (Hicks et al.,1995). Para facilitar a aplicação por aspersão do ligante, pode ser adicionado querosene para reduzir a viscosidade do ligante.

SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer), é uma camada de asfalto-borracha aplicada entre camadas de CAUQ (existentes e de reforço) quando da execução de uma reabilitação, para retardar o desenvolvimento de trincas por reflexão e reduzir a penetração de água em camadas subjacentes.

5.1.5 - Experiência implantada pelo DAER (Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Estado do Rio Grande do Sul)

Os segmentos de asfalto-borracha e asfalto convencional estão localizados na rodovia BR-116/RS, no trecho concedido ao Consórcio UniVias entre os municípios de Guaíba e Camaquã. A rodovia BR-116/RS é uma das mais importantes rodovias longitudinais do Plano Nacional de Viação. O segmento Guaíba – Camaquã, onde está inserido o trecho objeto deste estudo, faz parte do corredor que liga Porto Alegre ao porto de Rio Grande.

O trecho sul da BR-116/RS foi implantado pelo DAER a partir de 1954 e foi pavimentada entre 1958 e 1961. É composta por um subleito e base de saibro de granito e o revestimento constitui-se de camadas sobrepostas de tratamento superficial, pré-misturado a quente e concreto betuminoso usinado a quente.

O segmento em asfalto-borracha foi avaliado para registrar sua condição no momento da execução da nova camada asfáltica. Foram realizados os levantamentos da irregularidade longitudinal, deflexões e afundamentos de trilha de roda.

A execução dos trechos experimentais se deu em agosto de 2001 entre os km 318+475

e 319+200 para o segmento com asfalto-borracha e entre os km 309+500 e 310+200 para o segmento em asfalto convencional. O VMD (Volume Médio Diário) de veículos comerciais é de 1.400 por faixa de tráfego.

A construção do trecho experimental com asfalto-borracha procurou simular uma situação real de comparação entre um trecho da rodovia com a aplicação de asfalto-borracha e outro de asfalto convencional. Ambos os trechos avalizados apresentam um perfil longitudinal plano, sendo a seção transversal em aterro e com características de tráfego e clima semelhantes. Atualmente, com 24 meses após a execução, pode-se iniciar a avaliação preliminar quanto ao desempenho de ambas as misturas. Dessa forma, apresenta-se os seguintes resultados:

Resumo do Monitoramento após 10 meses da execução	
Avaliação após 10 meses da execução (maio / 2002)	Trincamento (% área fissurada / trincada)
Asfalto-borracha	0,00
Asfalto convencional	0,00

Resumo do Monitoramento após 24 meses da execução	
Avaliação após 24 meses da execução (julho/2003)	Trincamento (% área fissurada / trincada)
Asfalto-borracha	0,00
Asfalto convencional	1,30

Através dos resultados observados até o momento ainda não é possível a realização de uma análise conclusiva acerca do desempenho do asfalto-borracha frente ao asfalto convencional nos segmentos analisados. O monitoramento de trechos

experimentais apresentam-se como uma das maneiras mais eficazes de se obter resultados em termos de desempenho de pavimentos. Diante disso, a iniciativa de construção e monitoração do referido trecho experimental proporcionará muito em breve, resultados importantes em termos do comportamento do asfalto-borracha frente às condições reais de tráfego e clima e ainda proporcionará um comparativo frente à estrutura com condições semelhantes com asfalto convencional.

5.2 – PROPOSIÇÃO DE UTILIZAÇÃO DO ASFALTO-BORRACHA PARA RECUPERAÇÃO DE RODOVIAS FEDERAIS

Somente o DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes possui um universo de aproximadamente 50.000 km de rodovias para manter e operar. Sabe-se que em virtude de restrições orçamentárias/financeiras sucessivas, o crescente aumento da frota veicular e o excesso de peso por eixo nossas rodovias encontram-se em condições preocupantes de conservação.

Um diagnóstico recente elaborado pela Coordenação Geral de Manutenção e Restauração do DNIT resultou no seguinte planejamento para 4 anos:

META FÍSICA-FINANCEIRA DOS PROGRAMAS

CRONOGRAMA FÍSICO - FINANCEIRO		2003		2004		2005
		EXT.	ORÇ.	EXT.	ORÇ.	EXT.
PROGRAMAS INTEGRADOS DE REVITALIZAÇÃO	PIR I/II	6.154	283	6.154	179	6.154
	PIR III	8.560	305	8.560	383	8.560
	PIR IV	16.241	224	24.018	519	15.430
TOTAL		30.955	812	38.732	1.081	30.144
CONSERVA E RESTAURAÇÃO CONVENCIONAIS		28.114	596	18.000	216	12.000
PROGRAMA REVITALIZAÇÃO		-	-	9.268	213	17.856
TOTAL (MIL HÔES DE R\$)		5.415	1.408	1.510		



O VALOR TOTAL DOS PROGRAMAS PARA 04
(R\$ 5,4 BILHÕES) REPRESENTA 0,84%
PATRIMÔNIO RODOVIÁRIO (R\$ 645 BILHÕES)

Tabela 5 – Meta Física-Financeira dos Programas do DNIT

A nossa proposição é que inicialmente recuperássemos 5.000 km de rodovias com asfalto-borracha para avaliação de desempenho e futuro incremento do Programa. Considerando-se um consumo aproximado de 500 pneus /km (espessura = 2 cm) teríamos um consumo inicial de 2.500.000 pneus por ano apenas para recuperação de rodovias federais.

CAPÍTULO VI

ASPECTOS ECONÔMICOS



6.1 - ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Cury et al (2001) do Instituto Militar de Engenharia, conduziram uma análise comparativa entre a viabilidade econômica de utilização do asfalto convencional e do asfalto borracha considerando os custos de implantação e as despesas de manutenção.

O estudo baseou-se em dados das experiências realizadas nos Estados Unidos, particularmente nos estados da Califórnia, Flórida e Arizona que possuem atualmente, um grande conhecimento a respeito da incorporação de borracha na pavimentação e buscou aplicar os dados daquela experiência à construção de um trecho de rodovia no Rio Grande do Sul, utilizando ligantes modificados com borracha.

A experiência gaúcha mostrou que os custos produtivos praticamente não se alteram e a parcela maior do custo ficou por conta da logística associada à obtenção da borracha de pneu.

Partindo-se do fluxo de caixa considerado para o projeto de duplicação da rodovia BR-101 no trecho Florianópolis (SC)-Osório(RS) tem os valores apresentados na tabela 5.

Tabela 6 – Análise de Viabilidade do Asfalto Convencional

Taxa Mínima de Atratividade	12,0%
Valor Presente Líquido	US\$ 410,8 x 10 ⁶
Taxa Interna de Retorno	20,1 % aa

As hipóteses admitidas para análise do uso do asfalto borracha no trecho de rodovia considerado foram:

- a) que a mesma duplicação fosse feita com asfalto borracha
- b) custos de implantação

De acordo com dados da Rubber Pavement Association-RPA o asfalto borracha custa US\$ 2.09m² (2.50cm de espessura) comparado a US\$ 1.13m² para o asfalto convencional

A economia resulta de um ciclo de vida maior, que reduz o custo de manutenção e a utilização de menos material. O asfalto borracha requer geralmente apenas metade do material quando comparado ao asfalto tradicional.

Considerando que os custos de fabricação do asfalto borracha nos Estados Unidos são maiores devido ao maior custo da mão de obra, adotou-se valores indicados pelo professor Ceratti, observados na experiência realizada no Rio Grande do Sul.

O custo do asfalto borracha no caso brasileiro foi em média 40% maior do que aquele do asfalto convencional. Ademais, o custo de pavimentação foi desdobrado em

dois outros itens: o custo do revestimento (60%) e o custo da base (40%).

A aplicação dos valores dessas hipóteses àqueles consolidados na tabela 5, resultam nos valores obtidos na tabela 6.

Tabela 7- Análise de viabilidade do Asfalto Borracha

Taxa Mínima de Atratividade	12,0%
Valor Presente Líquido	US\$ 373,4 x 10 ⁶
Taxa Interna de Retorno	18,9 % aa

Tabela 8 - Custo reais e projetados para manutenção de rodovias(adaptado de Cury)

ANO	CUSTO TRADICIONAL (US\$/FAIXA/KM)	CUSTO ASF BORRACHA (US\$/FAIXA/KM)	DIFERENÇA PERCENTUAL
0	0.00	0.00	0
1	62.14	62.14	0
2	93.21	80.78	-13%
3	124.28	90.10	-28%
4	186.42	173.98	-7%
5	260.97	217.48	-17%
6	316.90	186.42	-41%
7	466.03	242.33	-48%
8	559.26	260.97	-53%
9	596.51	260.97	-56%
10	869.92	310.68	-64%

6.2 - ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA (LIFE CYCLE COST ANALYSIS)

Jung et al. (2002) conduziram estudo comparativo para dois trechos sequenciais com a mesma extensão da rodovia Interstate(I)-40 no Arizona, sendo um trecho

recuperado com asfalto convencional e o outro com asfalto borracha.

O estudo utilizou-se da análise do custo do ciclo de vida (life cycle cost analysis). A análise foi auxiliada por dois programas computacionais: o Microbencost e o HDM-4.

O primeiro foi desenvolvido pelo Instituto de Transporte do Texas e pode analisar sete categorias de projetos: aumento de capacidade, desvio, interseção, reabilitação de pavimento, ponte, segurança e cruzamento de rodovia ou ferrovia em nível. Esse programa pode ser usado para comparar diferentes alternativas de pavimentação durante determinados períodos de análise.

O segundo programa, o Highway Design and Maintenance Standard Model(HDM-4) foi elaborado pelo Banco Mundial. Esse programa aplica três ferramentas para análise do custo do ciclo de vida: análise estratégica, análise de programa e análise de projeto.

Os componentes da análise do custo do ciclo de vida foram agrupados em duas categorias: custos da agência (ou do órgão) e os custos do usuário. Para a agência considerou-se os custos iniciais de construção, reabilitação e manutenção. Com relação ao usuário foram levados em conta os custos decorrentes de atrasos no tempo de viagem e os custos operacionais do veículo.

O enfoque adotado no estudo, consistiu em comparar os custos do ciclo de vida em um determinado período para o pavimento com asfalto convencional e aquele com asfalto borracha. Os dados de tráfego para um período maior que 11 anos, foram

fornecidos pelo Departamento e Transporte do Arizona.

Ressalte-se que o programa HDM-4 desenvolvido para análise de rodovias de países em desenvolvimento, no caso presente (rodovias de alto padrão de construção) não conduziu a valores para os custos do usuário considerados confiáveis. Assim, tomando-se como base os custos iniciais de construção, de manutenção e os custos do usuário calculados com o auxílio do programa Microbencost tem-se os seguintes valores apresentados na tabela 8

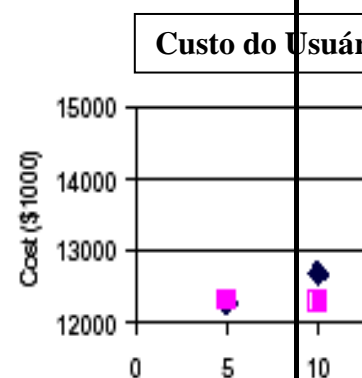
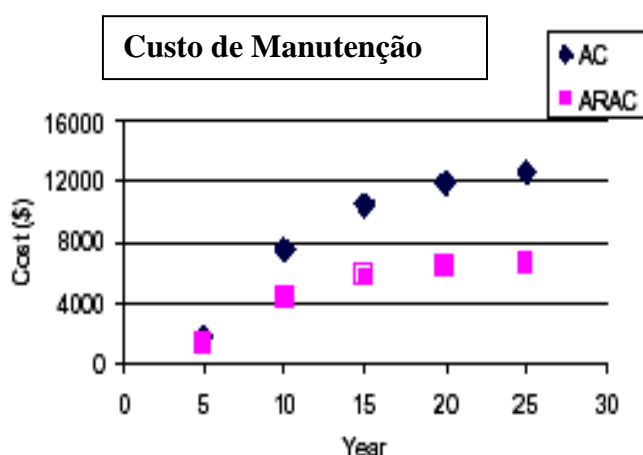
Tabela 9 – Comparação dos Custos de Construção, Manutenção e Usuário

A N O	ASF		ASF		Asf. Conv.		As f. Bo r- rac ha
	Custo de Manuten ção (\$)	Cust o do Usuá rio (\$10 00)	Custo de Manuten ção (\$)	Cust o do Usuá rio (\$100 0)	Custo de Manuten ção (\$)	Cust o do Usuá rio (\$100 0)	
0	1515008		875776		639232		
5	1844	122 96	1317	123 25	527	-29	
10	1477	127 05	4295	122 88	3182	417	
15	10471	132 88	5853	128 90	4618	398	
20	11998	139 81	6471	131 72	5527	809	
25	12649	148 00	6683	135 65	5966	1235	

A partir do dados da Tabela 9, é possível visualizar nos gráficos das figuras 4 e 5 as diferenças entre os custos de manutenção e

os custos para o usuário das alternativas usando asfalto convencional e asfalto borracha.

Figura 4
Figura5



CONCLUSÕES



A análise dos vários mercados para utilização de borracha de pneus inservíveis aponta dois que se destacam quanto ao potencial para consumir um número significativo de pneus: para geração de energia e a incorporação em misturas asfálticas.

Os custos envolvidos na instalação de equipamentos e a pressão de grupos ambientalistas preocupados com a emissão de poluentes favorecem o uso da borracha triturada em obras de pavimentação. As alternativas adotadas para o seu uso sugerem

mais a existência de uma regulamentação específica do que a adoção de impostos.

Estima-se que haja um potencial de consumir aproximadamente 10 milhões de pneus por ano, considerando que a cada tonelada de mistura asfáltica possa ser incorporado de 1 a 4 pneus usados de veículos de passeio.

No Brasil, o uso do asfalto-borracha ainda está restrito a estudos e pesquisas conduzidos em algumas universidades e pequenos testes localizados feitos em ruas e rodovias. Contudo, baseado nas experiências realizadas em países como os Estados Unidos algumas constatações podem ser feitas:

- Mesmo que a mistura com borracha custe o dobro da mistura com borracha, ainda assim os custos versus vida útil do pavimento ficam iguais;
- Benefício ambiental da retirada dos pneus usados do meio ambiente com a conseqüente diminuição do habitat de ratos e insetos transmissores de doenças;
- Diminuição da ocupação de leitos hospitalares em função da redução de doenças como a dengue e diminuição de faltas ao trabalho;
- Diminuição da poluição visual e de risco de incêndios em pilhas de estocagem de pneus.
- Possui resistência superior à oxidação e ao envelhecimento do que os asfaltos convencionais;

- É eficaz tanto em altas como em baixas temperaturas;
- Pode ser usinado, espalhado e compactado com equipamentos convencionais, apenas as temperaturas envolvidas são mais elevadas;
- A espessura da camada pode ser diminuída, mantendo-se a mesma vida útil esperada em projeto para um asfalto convencional
- Diminuição dos custos operacionais dos veículos;
- Diminuição do número de acidentes;
- É um produto instável e não estocável. Daí, serem necessários alguns cuidados como caminhões dotados de sistemas eficientes de aquecimento e misturadores, caso o produto tenha de percorrer longas distâncias.
- Observou-se uma redução de 5 dB no nível de ruído para veículos trafegando a 100 km/h; vale ressaltar que para cada 3 dB de acréscimo, o nível de ruído dobra. Isto significa que o nível de ruído é reduzido em quase quatro vezes (Edel, 2002).

Apesar de todas as vantagens técnicas, econômicas e sociais elencadas, talvez o grande benefício da utilização do asfalto borracha seja prioritariamente ambiental, pela possibilidade de utilização de pneus inservíveis.

O aprendizado, as observações e o acompanhamento do mercado mundial de asfalto borracha, leva-nos a acreditar que haja um grande potencial de utilização desse tipo de tecnologia no país. Que o poder

público, universidades e setor privado, estimulem pesquisas sobre essa tecnologia, que tem se mostrado superior àquela do asfalto convencional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



ABEDA –Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto. **Meias Verdades – Asfalto: de repente o grande vilão.** Disponível no site : <http://www.abeda.org>; acesso em 21/09/2003

ANDRIETTA, Antônio J. **Tipos de reciclagem – Pneus.** Disponível no site: <http://www.reciclarepreciso.hpg.ig.com.br>; acesso em 30/08/2003

ANIP (2001) – Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos

BERTOLLO, Sandra A. Margarido. **Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas Densas Modificadas com Borracha Reciclada de Pneus** 2002. Tese apresentada `Escola de Engenharia de São Carlos para obtenção do título de Doutora em Transportes, São Carlos

CEMPRE (1998) – Pneus ,Compromisso Empresarial para Reciclagem

DNER. Misturas Betuminosas a Quente-Ensaio Marshall, 1995

EDEL,Guilherme. **Pneus inservíveis e asfalto: União que beneficia estradas e**

meio ambiente. 2º Simpósio sobre Obras Rodoviárias, RODO 2002, São Paulo

CURY, M.V.Q et al. **Análise Sócio Econômica e Ambiental para o Uso de Asfalto Emborrachado na Construção de Rodovias.** Simpósio Brasileiro sobre Estradas e Interface Ambiental, Foz do Iguaçu, Paraná

ESTAKHRI et al. **Use, availability and cost-effectiveness of asphalt rubber in Texas.** Transportation Research Record 1339, TRB, Washington, 1992.

GRECA ASFALTOS. Cimento Asfáltico de Petróleo, CAP 7, 20 e 40. Disponível no site: <http://www.greca-asfaltos.com.br>. ; acesso em 21/09/2003.

HEITZMAN, M. **Design and construction of asphalt paving materials with Crumb Rubber Modifier.** Transportation Research Record, TRB, Washington, 1992

IPIRANGA. **Mão Dupla.** Publicação trimestral, nº 6 , março 2001.

JUNG, Jong-Suk; KALOUSH, Kamal; WAY, George. **Life Cycle Cost Analysis; Conventional versus Asphalt-Rubber Pavements.** Arizona State University e Rubber Pavement Association, 2002.

NAPA- National Asphalt Pavement Association. **History of Asphalt.** Disponível no site: <http://www.hotmix.org/history.php> ; acesso em 20/09/2003.

ODA, S. **Análise da Viabilidade Técnica do Uso do Ligante Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação.** 2000. Tese apresentada à

Escola de Engenharia de São Carlos para obtenção do título de Doutora, São Carlos.

Reutilização de pneus como alternativa para aumento da vida útil de aterros. 1º Fórum Ambiental de Maringá, 2001.

PETROBRÁS. Produtos asfálticos. Disponível no site: <http://www2.petrobras.com.br/produtos> ; acesso em 21/09/2003.

SALINI, Reus Bortolotto. **Utilização de Borracha Reciclada de Pneus em Misturas Asfálticas.** 2000. Dissertação apresentada para obter o título de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MARCON, Antônio Fortunato. **Utilização de borracha reciclada de pneus e misturas asfálticas.** 3º Encontro Ibero-Americano de Unidades Ambientais do Setor Transporte, 1998.

SPECHT, Luciano Pivoto; CERRATI, Jorge Augusto. **Polímeros como modificadores asfálticos.** Revista Transporte, ANPET, vol. 10, nº 1, Rio de Janeiro, 2002.

Estudo de misturas asfálticas modificadas com borracha. Seminário sobre Doutorado, RS, 2000.

ZANZOTTO, L; KENNEPOHL, G.J. **Development of Rubber and Asphalt Binders by Depolymerization of Scrap Tires in Asphalt.** Transportation Research Record 1530. TRB, Washington, 1996.

