FUNDAÇÃO PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS - FUPAC
FACULDADE PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS DE UBÁ
ENGENHARIA CIVIL

GILSON PEREIRA MELO

ASFALTO-BORRACHA:
CARACTERÍSTICAS E BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DA TECNOLOGIA

UBÁ/MG

2015

GILSON PEREIRA MELO

ASFALTO-BORRACHA:
CARACTERÍSTICAS E BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DA TECNOLOGIA

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Fundação Presidente Antônio Carlos – FUPAC, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: MSc. Enoque Pereira da Silva.

UBÁ/MG

2015

ASFALTO-BORRACHA: CARACTERÍSTICAS E BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DA TECNOLOGIA

Resumo

A pavimentação rodoviária é um processo de extrema importância para o desenvolvimento da sociedade e acontece em larga escala para suprir as necessidades na atualidade. Para ser construído, o pavimento utiliza materiais granulares e ligantes betuminosos, sendo este último aprimorado com o uso de materiais reciclados. Diante disso, o objetivo deste trabalho é apresentar as características da tecnologia do asfalto-borracha, bem como comparar seu comportamento e desempenho em relação ao asfalto convencional, e fazer um estudo sobre seu custo-benefício e sua contribuição ecológica. A utilização de pneus inservíveis, que passam por um processo de trituração para serem adicionados ao asfalto, tem sido uma alternativa que reduz os riscos ambientais e ao mesmo tempo melhora as características do pavimento. Estudos mostram que a implantação do asfalto-borracha, apesar de ser mais cara inicialmente, tem seus custos diluídos com o tempo devido a menor necessidade de manutenção e apresenta o reuso de um produto muito abundante.

Palavras-chave: Rodovias. Pavimentação. Meio ambiente.

ASPHALT RUBBER: CHARACTERISTICS AND ENVIRONMENTAL BENEFITS OF THE TECHNOLOGY

Abstract

The road paving is a process of extreme importance for the society development and happens in a large scale to supply the necessity in the present days. To be built, the pavement uses granular materials and agglutinative bitumen, which can be upgraded using recycled materials. The work aims to present the characteristics of the asphalt rubber technology, as well as compare its behavior and performance to the conventional asphalt, and make a study about its costs and ecological contribution. The use of disposed tires, which pass through a milling process before being added to the asphalt, is becoming an alternative that reduces the environmental risks and improves the pavement characteristics. Studies show that the implantation of the asphalt rubber, even being initially more expensive, has its costs amortized due to the less need of maintenance and presents the usage of a very abundant product.

Keywords: Highways. Pavement. Environment.

1 INTRODUÇÃO

Tendo em vista o crescente desenvolvimento e o aumento populacional, a sociedade se depara com a demanda de grande quantidade de matéria-prima, o que, no futuro, será convertida em rejeitos, como exemplo, os pneus automotivos.

No Brasil, país onde o transporte rodoviário é predominante, um estudo feito pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas para a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP) revela que, de cerca de 22 milhões de pneus trocados anualmente, 53,2% são inservíveis (não podem mais rodar em veículos automotivos) e 46,8% podem ser reformados mediante avaliação, lembrando que ainda existe uma grande quantidade de pneus dispostos inadequadamente (SANTOS, 2012, p. 6).

O descarte de pneus demanda espaço para armazenagem e gera sérios riscos ambientais, já que leva até 600 anos para se decompor. Surge então a oportunidade de aproveitar este descarte em uma tecnologia ainda não muito explorada, o asfalto-borracha, um composto asfáltico que utiliza pó de borracha de pneus inservíveis em sua composição, convertendo o asfalto convencional em um material mais resistente e trabalhável (MARTINS, 2004).

O asfalto-borracha surgiu nos anos 1960 nos Estados Unidos, desenvolvido pelo engenheiro norte-americano Charles H. McDonald, como solução para reparar as ruas da cidade de Phoenix, Arizona, e como uma forma de dar destino ao grande número de pneus que eram descartados na natureza. Sua aplicação está presente em aproximadamente 70% da malha rodoviária do Arizona, e também nos estados da Flórida, Texas e Califórnia. África do Sul, Portugal, França e Brasil são outros países a utilizarem a tecnologia atualmente (Mendes; Nunes, 2009).

No Brasil, o asfalto-borracha começou a ser utilizado no ano de 2000, após a realização do primeiro congresso sobre o assunto, em Portugal, mostrando que o país ainda se encontra defasado em relação à idade que a tecnologia já possui. Trechos da BR-116, algumas ruas e rodovias dos estados do Rio de Janeiro e São Paulo e na rodovia ES-080, no Espírito Santo são alguns exemplos de aplicação no país (MENDES; NUNES, 2009).

O asfalto-borracha consiste em um concreto betuminoso que utiliza pó de borracha de pneus descartados adicionado ao ligante asfáltico. O resultado é um concreto asfáltico que tem a capacidade de garantir maior durabilidade, aderência e impermeabilidade ao pavimento, reduz trincas na superfície e nível de ruído proporcionando, portanto, mais segurança e conforto aos usuários das rodovias e reduzindo a manutenção (MARTINS, 2004).

Diante disso, o objetivo deste trabalho é apresentar as características da tecnologia do asfalto-borracha, bem como comparar seu comportamento e desempenho em relação ao asfalto convencional, e fazer um estudo sobre seu custo-benefício e sua contribuição ecológica.

2 DESENVOLVIMENTO

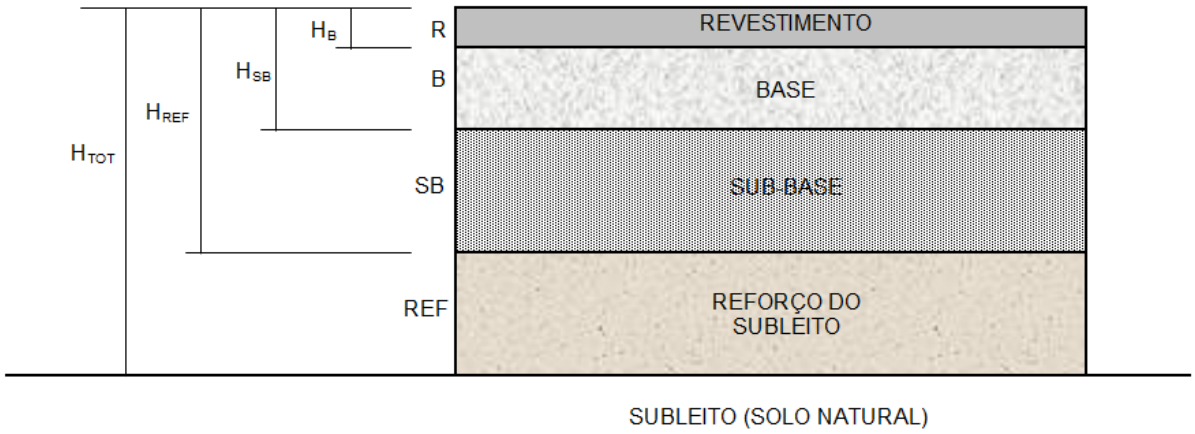
2.1 Revisão de Literatura

2.1.1 O pavimento rodoviário

Entende-se por pavimento rodoviário uma sequência de camadas estrategicamente posicionadas, assim como mostra a FIG. 1, que têm a função de absorver e distribuir as cargas provenientes dos veículos que trafegam na rodovia para o solo natural onde são posicionadas, constituindo uma estrutura capaz de resistir, por um período de tempo determinado (vida útil do pavimento), aos esforços gerados pelo tráfego e às intempéries, garantindo ao usuário da rodovia segurança e conforto. Cada camada tem uma função específica na constituição do pavimento e diferem entre si em espessura e materiais de composição, estabelecidos através de dimensionamento.

"Dimensionar um pavimento significa determinar espessuras de camadas e os tipos de materiais a serem utilizados em sua construção, de modo a conceber uma estrutura capaz de suportar um volume de tráfego preestabelecido, nas condições climáticas locais" (BALBO, 2007, p. 375).

FIGURA 1 – Esquema das camadas de um pavimento rodoviário



Fonte: PRÓPRIO AUTOR

Segundo BALBO (2007, p. 37), o pavimento rodoviário é constituído basicamente pelas seguintes camadas:

a) Subleito: é a camada inferior do pavimento que servirá de fundação, constituída de solo natural, que poderá ser compactado no caso de aterro.

b) Reforço do subleito: esta camada tem como finalidade reforçar o solo do subleito utilizando um solo de melhor qualidade e nivelar sua superfície para o recebimento da base.

c) Sub-base: camada complementar à base. Deve ser usada quando não for aconselhável executar a base diretamente sobre o leito regularizado ou sobre o reforço, por circunstâncias técnico-econômicas. Pode ser usado para regularizar a espessura da base.

d) Base: camada destinada a resistir e distribuir ao subleito os esforços oriundos do tráfego e sobre a qual se construirá o revestimento. Na TAB. 1, a seguir, constam os dois tipos de base utilizadas na pavimentação, bem como suas características.

TABELA 1 – Definição dos tipos de base do pavimento

<table>
<tr><td rowspan="11">Bases</td><td rowspan="3">Rígidas</td><td colspan="2">Concreto de cimento</td></tr>
<tr><td colspan="2">Macadame de cimento</td></tr>
<tr><td colspan="2">Solo-cimento</td></tr>
<tr><td rowspan="8">Flexíveis</td><td rowspan="3">Solo estabilizado</td><td>Granulometricamente</td></tr>
<tr><td>Solo-betume - solo-cal</td></tr>
<tr><td>Solo-brita</td></tr>
<tr><td colspan="2">Macadame hidráulico</td></tr>
<tr><td colspan="2">Brita graduada com ou sem cimento</td></tr>
<tr><td colspan="2">Macadame betuminoso</td></tr>
<tr><td>Alvenaria poliédrica</td><td rowspan="2">Por aproveitamento</td></tr>
<tr><td>Paralelepípedos</td></tr>
</table>

Fonte: SENÇO (1997 *apud* MENDES; NUNES, 2009, p. 33)

As bases rígidas podem ser construídas de concreto de cimento, armado ou não, ou de macadame de cimento, que consiste em blocos de cimento com granulometria extensa, ou ainda podem ser construídas com solo reforçado pela adição de cimento, dosado de acordo com o projeto de pavimentação. As três metodologias são responsáveis por garantir que a base se torne rígida o suficiente para suportar o tráfego (BALBO, 2007, p. 155).

No caso das bases flexíveis, como o nome já diz, devem possuir solo que permita certa flexibilidade sem por em risco sua resistência, sendo esse solo estabilizado granulometricamente, quando são acrescentados agregados com granulometria mais extensa, garantindo uma estabilização puramente mecânica. Um exemplo de estabilização é a adição

de brita graduada, ou estabilizados quimicamente, no caso da adição de betume ou cal (BALBO, 2007, p. 157).

Outro tipo de estabilização da camada de base pode ser obtida com macadame, podendo ser hidráulico, quando constituído de agregados com granulometria extensa que têm seus vazios preenchidos por agregados miúdos que reagem com água, ou macadame betuminoso, que possui agregado graúdo constituído por material betuminoso (BALBO, 2007, p. 158).

Alvenaria poliédrica, que são pedras britadas com granulometria mais extensa, e paralelepípedos (rochas de faces paralelas), ambos muito utilizados no calçamento de ruas, também têm função de estabilizantes de bases flexíveis (BALBO, 2007, p. 160).

e) Revestimento: camada superior do pavimento responsável por resistir ao desgaste proporcionado pelo rodar dos veículos e às intempéries, garantindo conforto e segurança aos usuários da rodovia, construída geralmente de concreto ou asfalto.

As camadas de um pavimento seguem algumas metodologias estabelecidas ao longo dos anos para serem dimensionadas, podendo variar de acordo com a localidade ou mesmo com a opinião dos técnicos, mas se resumem basicamente em dois tipos distintos: métodos empíricos e semi-empíricos.

> Os métodos de projeto existentes foram, via de regra, concebidos de duas maneiras distintas: com base nos resultados últimos ou no desempenho observado ao longo do tempo, obtidos pelas experiências em campo (modelos empíricos) ou a partir de teoria elástica considerada adequada para a interpretação dos fenômenos físico quantitativos em campo (modelos semi-empíricos e semiteóricos) (Balbo, 2007, p. 376).

O método de dimensionamento utilizado no trabalho será caracterizado como semi-empírico, utilizando como critério de dimensionamento os valores obtidos de California Bearing Ratio (CBR) para cada camada do pavimento, por se tratar de um método amplamente utilizado pelas agências federais, estaduais e municipais no Brasil, sofrendo pequenas variações.

2.1.1.1 Índice de Suporte Califórnia

CBR ou Índice de Suporte Califórnia (ISC) é um valor percentual obtido por meio da relação feita entre a resistência do solo a ser utilizado na constituição da camada do pavimento e uma amostra padrão de brita graduada. Os valores são obtidos por meio de um mecanismo que mede o esforço necessário para inserir um pino metálico a uma profundidade preestabelecida no solo em estudo e na brita graduada, separadamente.

De acordo com o valor de CBR de cada camada de solo e do número N (número equivalente de eixos padrões que se estima passar na rodovia) é possível efetuar o dimensionamento de cada camada do pavimento, obtendo a espessura das camadas e o material de que serão compostas (BALBO, 2007, p. 377).

Os pavimentos caracterizam-se em três diferentes tipos, quanto à sua constituição e comportamento: rígidos, semi-rígidos e flexíveis.

2.1.1.2 Pavimentos rígidos

No caso dos pavimentos rígidos, a camada de revestimento, que é a camada superior, consiste em uma laje de concreto de cimento Portland, armado ou não, apoiada sobre a sub-base de material granular ou, no caso de tráfego intenso, por solo estabilizado com ligante hidráulico (solo-cimento) e desempenhando o papel de revestimento e base, com espessura suficiente para resistir a severas condições climáticas e de tráfego intenso e lento. Por se tratar de uma estrutura de alta robustez, o revestimento do pavimento rígido não exige uma sub-base de alta qualidade, já que tem a capacidade de absorver quase toda a carga que possa vir a ser distribuída.

“A elevada resistência deste tipo de pavimento, devida à resistência à flexão do betão de cimento, faz com que eles não sofram deformações acentuadas, mesmo quando submetidos a condições severas de tráfego pesado, intenso e lento, e a elevadas temperaturas” (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2008, p. 15).

2.1.1.3 Pavimentos flexíveis

Os pavimentos flexíveis, assim como os rígidos, são constituídos de camadas sobrepostas, mas diferenciam-se pelo fato de exigirem que todas as camadas possuam uma função estrutural, sendo sempre a camada superior dimensionada em função da resistência

que a camada anterior possui. A camada de revestimento é constituída de material betuminoso, dimensionada para suportar deformação em sua estrutura proveniente da carga empregada pelo tráfego.

"A constituição de um pavimento flexível pode ser muito diversa, em função da intensidade do tráfego, da resistência do solo de fundação e das características dos materiais disponíveis, as quais, por sua vez, dependem das condições climáticas" (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2008, p. 13).

2.1.1.4 Pavimentos semi-rígidos

Tratando-se dos pavimentos semi-rígidos, a camada de revestimento possui as mesmas características dos pavimentos flexíveis, constituição por materiais betuminosos que possuem capacidade elástica e pequena espessura, diferenciando-se dos demais tipos de pavimentos por possuir base e sub-base com maior poder resistivo. A base é constituída por solo estabilizado por ligantes hidráulicos e a sub-base é reforçada por material de granulometria mais extensa, sendo ambos responsáveis por absorver toda a carga que o pavimento será submetido.

"Neste tipo de pavimento é a camada de base, devido à sua elevada rigidez, que absorve a maior parte dos esforços verticais que deste modo atuam sobre o solo de fundação com valores muito reduzidos" (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2008, p. 15).

2.1.2 Patologias encontradas no pavimento rodoviário

Como toda estrutura destinada a receber esforços, o pavimento rodoviário apresenta sinais de desgaste ao longo do tempo, devido ao uso normal ou à ineficiência causada por erros de projeto. Dentre as patologias que possam vir a ocorrer, são duas que possuem maior destaque por ocorrerem com mais frequência: as trincas superficiais e a deformação permanente na camada de revestimento asfáltico.

2.1.2.1 Trincas superficiais

As trincas superficiais, como mostrado na FIG. 2, comumente conhecidas como "couro de jacaré", consistem no rompimento da camada asfáltica originado por tráfego pesado e falta de flexibilidade ou elasticidade do componente asfáltico, ou mesmo espessura

inadequada da camada, podendo ocasionar maiores problemas como o desprendimento de parte do revestimento, já que este se tornará permeável (MENDES; NUNES, p.37).

2.1.2.2 Deformação permanente

A deformação superficial permanente da camada de rodagem do pavimento no trilho de roda ocorre principalmente por densificação dos materiais utilizados na composição do concreto betuminoso e também em decorrência de ruptura por cisalhamento.

Segundo Mendes e Nunes (2009, p. 38) "a resistência ao cisalhamento de uma mistura asfáltica depende da estrutura de agregados, mas também depende das características de rigidez do ligante asfáltico".

A FIG. 3 mostra um trecho de rodovia que sofreu grandes alterações na superfície da camada de rodagem devido à deformação superficial permanente.

FIGURA 2 – Incidência de trincas no pavimento

Fonte: MENDES; NUNES (2009, p. 37)

FIGURA 3 – Deformação permanente na camada de revestimento

Fonte: MOURA (2010, p. 173)

2.1.3 O descarte de pneus inservíveis

Com o desenvolvimento da sociedade, a necessidade de deslocamento, seja ele de pessoas ou mercadorias, por lazer ou necessidade, está sempre aumentando, demandando grande quantidade de material de reposição para manutenção dos equipamentos de transporte, assim como no transporte rodoviário, que exige constante manutenção do pavimento e reposição de pneus, gerando o problema do descarte, já que após sua vida útil, o pneu não pode mais ser utilizado em veículos automotores.

Segundo Mendes e Nunes (2009, p. 39) “juntamente com a revolução no setor dos transportes, a utilização dos pneus de borracha trouxe consigo a problemática do impacto ambiental, uma vez que a maior parte dos pneus descartados permanece abandonada em locais inadequados, causando grandes transtornos para a saúde e qualidade de vidas”.

Os números são altos quando se fala em descarte de pneus, estimando-se que cerca de 22 milhões de pneus sejam trocados anualmente no Brasil, sendo que, deste montante, 53,2% (aproximadamente 11,7 milhões) são considerados inservíveis, não podendo mais ser utilizados em veículos automotores e 46,8% (aproximadamente 10,3 milhões) podem ser restaurados mediante avaliação (SANTOS, 2012, p. 6).

Diante dessa realidade, a falta de alternativas e também de incentivo pelos órgãos governamentais para o aproveitamento dos pneus inservíveis faz com que estes sejam dispostos em locais inadequados, trazendo sérios riscos à saúde, já que quando abandonados, demandam uma grande extensão de terreno, como aparece na FIG. 4, e se tornam depósito de água pluvial, atraindo doenças. Quando dispostos em ambientes abertos, correm o risco de se incendiarem, gerando um gás altamente tóxico e um resíduo líquido que infiltra no solo, contaminando o lençol freático. Se forem aterrados, são comprimidos pela carga gerada pelo solo e tendem posteriormente a retornarem à sua dimensão original, causando grande movimentação do solo ao redor do aterro.

> No Brasil, ainda não há uma lei semelhante que obrigue a utilização de uma porcentagem mínima de pneus descartados em obras de pavimentação. Mas já ocorreram avanços, como a Resolução 258 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), aprovada em 26 de agosto de 1999, que estabelece o conceito de que o produtor é o responsável pelo destino final do produto. Por exemplo, no caso dos pneus, a carcaça voltaria para a montadora. Pela resolução 258, desde janeiro de 2002, produtores e importadores de pneus são forçados a coletá-los e colocá-los em locais ambientalmente adequados. (Oda; Júnior, 2001, p. 3).

FIGURA 4 – Depósito de pneus inservíveis nos EUA

Fonte: ODA; JÚNIOR (2001, p. 2 e 4)

2.1.4 Algumas formas de aproveitamento dos pneus inservíveis

2.1.4.1 Recauchutagem

Quando o pneu atinge sua vida útil é comum, em algumas situações, como no caso de veículos de transporte de cargas ou transporte coletivo, que seja feita uma reforma em sua estrutura, quando constatado que ele ainda suporta ser reformado, para prolongar sua vida útil. Esta prática é chamada de recauchutagem e, a nível nacional, é responsável por reformar três a cada quatro pneus que completam sua vida útil.

Segundo Salini (2000, p. 15) "a prática da recauchutagem não elimina o problema ambiental causado pelos pneus, apenas retarda a sua ocorrência, pois, em última instância, também os pneus recauchutados necessitam ser descartados".

2.1.4.2 Queima para produção de energia

Como fonte de energia, os pneus inservíveis podem fazer o papel do carvão em fornos de alta temperatura, pois possuem grande quantidade de calorias. As indústrias exigem que os pneus sejam cortados em partículas de 50 a 150 mm de diâmetro para serem utilizadas nos fornos e, em alguns casos, é exigido que as partículas do metal presente na estrutura dos pneus sejam extraídas. Elas também não aceitam pagar para receber os pneus inservíveis, ou pagam apenas um valor suficiente para a trituração e transporte da borracha, fazendo com que o fornecimento de pneus como fonte de energia seja uma atividade não lucrativa.

> Em países que tradicionalmente utilizam carvão com elevado nível de enxofre, não foram verificadas diferenças significativas entre a emissão de gases poluentes produzidos por borracha de pneus e pelo carvão. Relatórios também sugerem que algumas empresas que utilizam pneus como combustível têm problemas para controlar os níveis de emissão de poluentes. Também já foram identificados níveis elevados de zinco e cromo nas cinzas resultantes da queima. Parece haver uma tendência de que os pneus continuem sendo utilizados como combustíveis ainda por algum tempo, até que a recuperação da borracha dos pneus para reaproveitamento seja feita de forma mais eficiente e em maior escala (Salini, 2000, p. 13).

2.1.4.3 Pirólise

Uma outra alternativa para o aproveitamento dos pneus inservíveis é o processo de extração de energia da borracha por pirólise, que consiste em aquecer os pneus a uma temperatura superior a 1000°C em um ambiente com pouca ou elevada concentração de oxigênio e pressão abaixo da atmosférica, dessa forma, fazendo com que a borracha do pneu seja superaquecida sem entrar em combustão. Os resultantes serão gases voláteis que podem ser queimados para a produção de vapor ou utilizados como combustíveis em motores adaptados e também uma fração líquida que pode ser refinada e transformada em combustível. Ao final do processo ainda sobra uma parcela que consiste em carbono (carvão), que pode ser prensada formando blocos ou granulados.

O carbono produzido pelo processo de pirólise possui baixa qualidade por conta da contaminação por zinco e outros metais, reduzindo seu valor de revenda. Para que a qualidade do produto final possa ser melhorada é necessário que o metal da composição do pneu seja previamente extraído, mas esse procedimento implica em mais tarefas, equipamentos e instalações industriais.

O maior agravante desse processo é o alto nível de contaminação que as partículas resultantes do processo podem ocasionar já que, durante a operação dos sistemas, os trabalhadores podem inalar essas partículas e correrem o risco de contraírem câncer.

“A pirólise não é atualmente considerada viável do ponto de vista econômico devido ao baixo valor de venda dos produtos gerados e complexidade do processo” (SALINI, 2000, p. 15).

2.1.4.4 Aplicações em estradas

Os pneus inservíveis podem ser triturados, cortados ou utilizados inteiros para servirem como enchimento em aterros, possuindo importante papel na substituição de agregados e evitando serem dispostos em locais inapropriados. É um material leve e barato, que tem como característica a permeabilidade, que permite que a água infiltre no lençol freático.

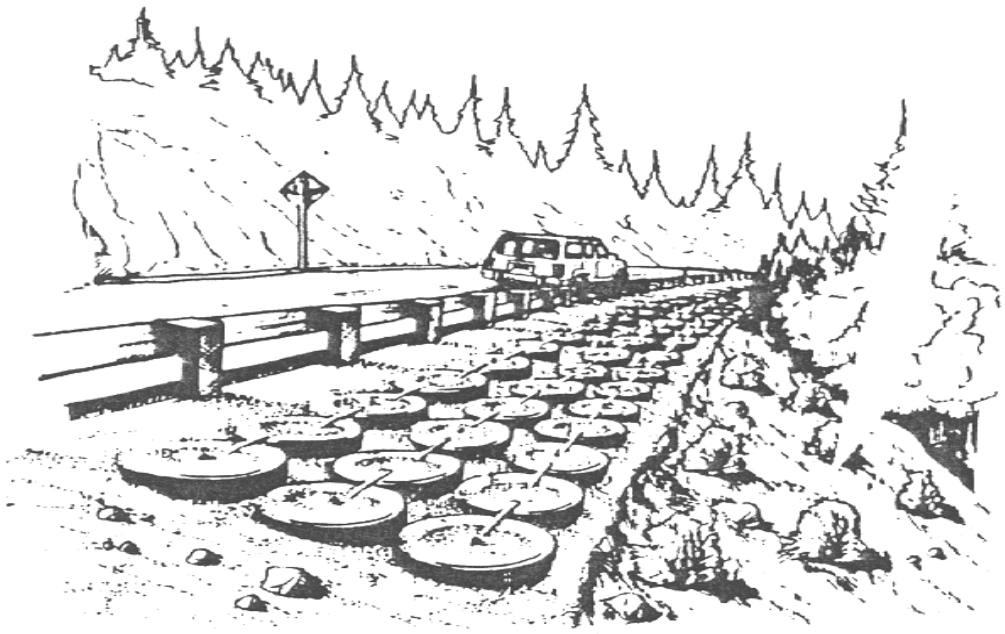
Contudo, há alguns problemas acerca do uso dos pneus em aterros. Sendo compostos altamente inflamáveis, uma vez incendiados, geram gases altamente tóxicos e um composto líquido que pode contaminar o lençol freático. Além disso, quando comprimidos pelo aterro, a estrutura do pneu tende a voltar a sua forma original, causando grande movimentação do solo.

Como há carência no estudo desse tipo de aplicação, não se sabe até que ponto isso poderia afetar na estrutura do aterro.

Em 1985, no Estado de Minnesota, foi proposto o emprego de pneus como uma espécie de geogrelha em regiões com solo mole, tendo várias seções experimentais executadas. Após dois anos de observações, os recalques verificados variaram entre 30 cm e 45 cm, situando-se entre 30 cm e 60 cm menores que os esperados em condições convencionais (sem reforço da fundação de aterro) (SALINI, 2000, p. 18).

Assim como apresentado na FIG. 5, os pneus podem ser utilizados como estabilizadores de ombreiras de rodovias, substituindo tecnologias mais caras como gabiões, por exemplo. Os pneus são posicionados entre a rodovia e o talude e são afixados por dispositivos metálicos.

FIGURA 5 – Ilustração do uso de pneus como estabilizadores de ombreiras

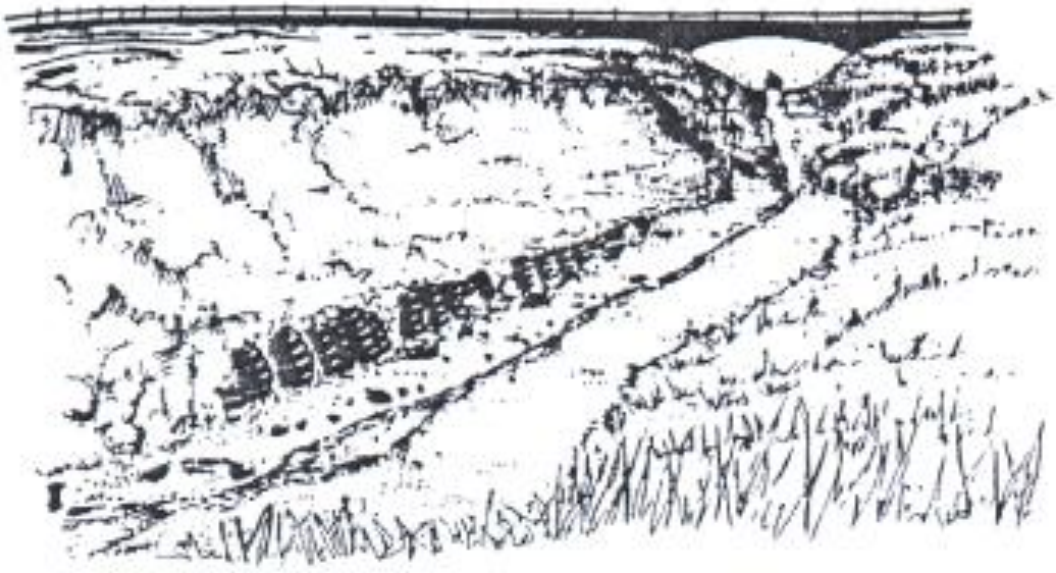


Fonte: SALINI (2000, p. 18)

Como proteção, os pneus também podem servir em taludes onde há iminência de erosão do solo por falta de proteção na sua base. Devem ser empilhados na posição horizontal, na sua dimensão original, e afixados com clips metálicos corretamente dimensionados, formando uma parede capaz de proteger o solo da base do talude e estabilizá-lo, assim como mostrado nas FIG. 6 e 7. Como na estabilização de ombreiras, os pneus aplicados como protetores de taludes são uma opção barata e eficiente, substituindo estruturas mais complexas.

Para que a aparência da parede de pneus não seja um grande contraste com a paisagem, é sugerido que ela seja ocultada pela vegetação ou mesmo pintada.

FIGURA 6 – Ilustração de talude de um riacho protegido por pneus



Fonte: SALINI (2000, p. 19)

FIGURA 7 – Estabilização de talude com uso de pneus

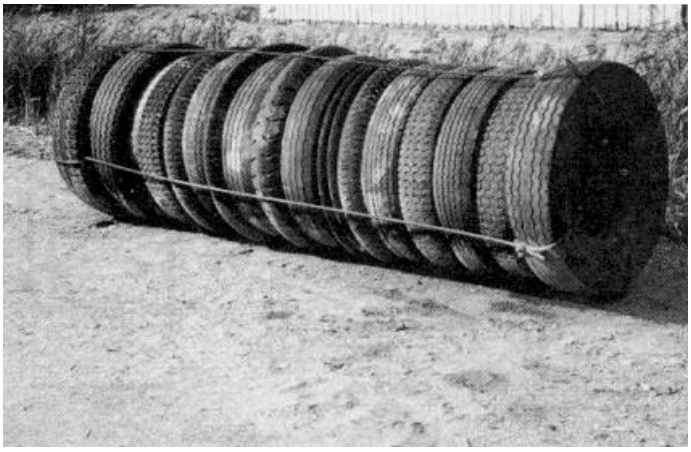
Fonte: MENDES; NUNES (2009, p. 43)

Em 1975, no estado de Connecticut, EUA, foi testada uma barreira de inércia atenuadora de impacto de veículos construída com pneus preenchidos com areia na junção

entre duas rodovias, o que apresentou bons resultados em relação às estruturas de redução de impacto convencionais. Segundo estudos realizados, a tecnologia se mostrou satisfatória em relação à desaceleração dos veículos e possui baixo custo de implantação e manutenção, mas os resultados não foram conclusivos no que diz respeito aos danos causados pela colisão.

Alguns estados americanos como Vermont e Geórgia testaram uma solução de drenagem pluvial utilizando os pneus inservíveis. Consiste na construção do próprio bueiro utilizando pneus posicionados um ao lado do outro e presos por uma haste metálica formando módulos que são unidos para darem origem aos tubos da drenagem, como mostra a FIG. 8.

FIGURA 8 – Módulo de drenagem pluvial composto por pneus inservíveis



Fonte: SALINI (2000, p. 20)

2.1.4.5 Trituração da borracha

O processo de aproveitamento dos pneus inservíveis que se mostra mais eficiente, tanto para o desempenho que o produto final apresenta como para o benefício ambiental, é o processo de trituração da borracha. Ele pode ser classificado em dois tipos: processo criogênico e trituração à temperatura ambiente.

No processo criogênico a borracha do pneu é resfriada à temperaturas entre 87° e 198°C negativos e então é triturada por maquinário específico, obtendo como resultado partículas de tamanho reduzido de borracha, entre 0,5 e 0,1 mm. O processo criogênico de trituração da borracha pode se tornar inviável se não for executado em larga escala, pois, para que a borracha seja resfriada, há a necessidade do uso entre 0,7 e 1,2 litros de gás criogênico para cada quilograma de borracha triturada.

Além disso, no processo de resfriamento a borracha perde parte de sua resistência, resultando em um material com características físicas inferiores quando comparado ao

processo de trituração à temperatura ambiente, e os grãos provenientes do processo de trituração apresentam arestas polidas e pequena superfície específica, o que dificulta sua interação com outros agregados e ligantes, se forem ser utilizados em misturas asfálticas (SALINI, 2000).

No processo de trituração à temperatura ambiente, a borracha passa por até seis processos até alcançar a granulometria desejada, que se encontra entre 3,0 e 0,5 mm. O aço presente na estrutura do pneu é retirado por eletroimãs, o que pode ser alcançado já no primeiro estágio da trituração quando se trata de maquinário mais moderno, e as fibras são extraídas por peneiramento.

O resultado são grãos de borracha que apresentam qualidade superior aos obtidos pela tecnologia criogênica, especialmente quando se fala em arestas e superfície específica, que permitem que o agregado tenha ótimo desempenho quando empregado em misturas com outros compostos.

Apesar da melhoria em relação à qualidade do material, o processo de trituração à temperatura ambiente também apresenta algumas desvantagens. Uma delas é que as características químicas da borracha também podem ser alteradas, o que ocorre devido ao aquecimento gerado pelo atrito do composto com os equipamentos de moagem, que deve ser controlado adequadamente. Outra desvantagem é o espalhamento dos grãos triturados pelas instalações da indústria, o que pode gerar grande perda de material se não for submetido a controle rigoroso.

Segundo Salini (2000, p. 17) “este processo é o mais empregado atualmente por possuir a melhor relação custo-benefício”.

2.1.5 Asfalto

“O asfalto é um material betuminoso natural. Aparece na natureza sob a forma de “lagos de asfalto”, como acontece em Trindad e Tobago e nas Bermudas, ou ainda na região de Ambrizete em Angola” (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2008, p. 44).

Assim como o alcatrão, material betuminoso resultante da destilação destrutiva do carvão mineral, o asfalto pode ser obtido através da destilação do petróleo e também pode ser encontrado na natureza, resultante de um processo de lenta evaporação das frações leves de petróleo no tempo geológico ou ainda de rochas asfálticas. Possui papel importante na pavimentação rodoviária, tendo a função de ligante na composição do concreto asfáltico, material utilizado na confecção da camada de revestimento do pavimento.

Conhecido também como CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), quando originado da destilação do petróleo, ou CAN (Cimento Asfáltico Natural), quando extraído da natureza, o asfalto possui características essenciais para seu papel de ligante no concreto asfáltico.

Quando estão à temperatura ambiente se encontram no estado semi-sólido, necessitando de aquecimento para adquirirem a consistência apropriada para o envolvimento dos agregados, sendo um material de boa flexibilidade, durabilidade, aglutinação, impermeabilização e elevada resistência à ação da maioria dos ácidos (BAUER, 2010).

2.2 Asfalto-borracha

Asfalto-borracha consiste em uma camada aplicada sobre o pavimento antigo ou sobre uma camada de brita graduada devidamente dosada de acordo com o projeto de pavimentação. Preparada e aplicada a quente, constituída de material betuminoso, agregado mineral (pedra britada, areia e pedregulho britado) e pó de borracha obtida de pneus inservíveis (Mendes; Nunes, 2009, p. 44).

Na FIG. 9 a seguir ocorrem, respectivamente, recapeamento e construção de camada de revestimento utilizando asfalto-borracha.

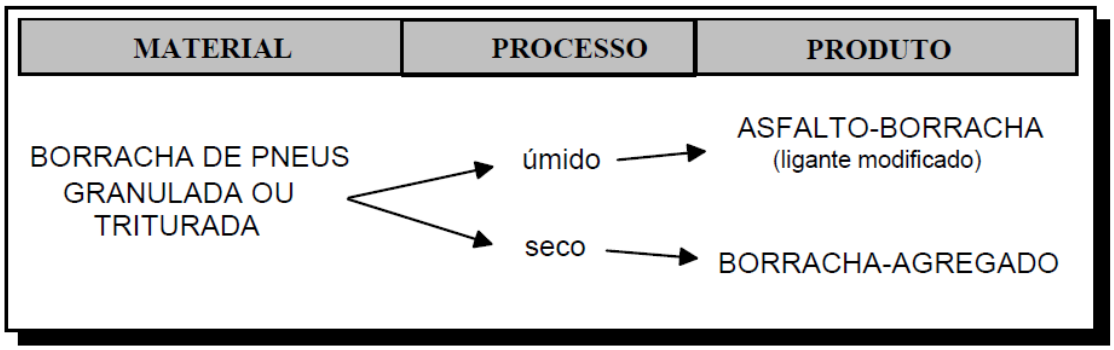
FIGURA 9 – Recapeamento e construção de camada de revestimento

Fonte: MARTINS (2004, p. 28)

O processo de fabricação do asfalto-borracha consiste em misturar a quente o pó de borracha de pneus triturados diretamente com o cimento asfáltico (CAP), antes de aplicar a mistura aos agregados minerais, conhecido como “processo úmido”, do inglês *wet process*, que será discutido posteriormente.

Outro processo que utiliza o pó de borracha em sua composição consiste em adicioná-lo ao concreto betuminoso antes do ligante asfáltico, substituindo parte dos agregados minerais, conhecido como “processo seco”, do inglês *dry proccess*. Os dois processos são esquematizados na FIG. 10 a seguir.

FIGURA 10 – Processos para o uso de borracha no concreto asfáltico



Fonte: SALINI (2000, p. 21)

2.2.1 História do asfalto-borracha

Segundo Martins (2004, p. 21) os primeiros indícios do uso da borracha para modificação das propriedades do betume ocorreram na Inglaterra nos anos 1890, que recebeu o nome de *rubber-bitumen*, do inglês betume-borracha. Porém a ideia só teve repercussão quando a Companhia de Reciclagem de Borracha, Rubber Reclaiming Company, lançou, em 1940, um produto composto de material asfáltico contendo borracha desvulcanizada reciclada, que recebeu o nome de Ramflex.

Em 1963 o engenheiro norte americano Charles H. McDonald, considerado pai da tecnologia do asfalto-borracha, desenvolveu um material altamente elástico com o propósito de utilizá-lo na manutenção do pavimento asfáltico no estado do Arizona. Seu produto consistia numa mistura de ligante asfáltico com 25% de borracha triturada de pneus em sua composição, batizado de Overflex, até então, o produto com melhor desempenho para tal finalidade já apresentado (MARTINS, 2004, p. 22).

Devido à importância ambiental em se encontrar alternativas para o consumo dos pneus usados, em 1991 o ISTEA (Intermodal Surface Transportation Efficiency Act – EUA) determinou a utilização de borracha de pneus em pavimentos asfálticos. A partir desta data, muitas novas tecnologias começaram a ser pesquisadas e avaliadas. Os estudos começaram com misturas similares ao PlusRide e ao processo McDonald e atualmente os processos estão em contínuo aperfeiçoamento (Salini e Marcon, 1998 *apud* Martins, 2004, p. 22).

2.2.2 Asfalto-borracha no mundo

"Diversos países adotaram o asfalto-borracha não apenas como uma boa solução ecológica, mas também como uma maneira de se obter pavimentos mais duráveis e seguros, a um preço razoável e com baixa necessidade de manutenção" (Mendes; Nunes, 2009, p. 46).

Nos Estados Unidos, onde a tecnologia foi inventada há mais de 40 anos, mais de 70% da malha rodoviária do estado do Arizona é pavimentada com asfalto-borracha. A produção da mistura teve um salto, passando de 900 toneladas/ano em 1985 para 37.000 toneladas/ano em 2001 (MENDES; NUNES, 2009, p. 46).

Na França a tecnologia começou a ser utilizada em 1982 para pavimentação de estradas, ruas e aeroportos, totalizando em um período de seis anos uma área de 3.000.000 m² (MENDES; NUNES, 2009, p. 46).

2.2.3 Asfalto-borracha no Brasil

"No Brasil, as aplicações de asfalto borracha em rodovias se iniciaram em escala comercial após o ano de 2000, depois da realização do 1° congresso mundial sobre o assunto, em Portugal" (Mendes; Nunes, 2009, p. 47).

No estado do Rio Grande do Sul, trechos da BR-116 entre Guaíba e Barra do Ribeirão foram pavimentados com asfalto-borracha, em 2001.

A tecnologia foi usada em diversas estradas e ruas dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, sendo inclusive responsável por manutenir a Avenida Atlântica em Copacabana, uma importante e histórica avenida da cidade do Rio de Janeiro, mostrada na FIG. 11 .

No Espírito Santo o asfalto-borracha foi utilizado na pavimentação de dois trechos na ES-080, sendo eles: São Domingos – Águia Branca e Águia Branca – Córrego do Óleo, responsável por recuperar um total de 52 quilômetros de pavimentos (MENDES; NUNES, 2009, p. 47).

FIGURA 11 – Avenida Atlântica, Copacabana, pavimentada com asfalto-borracha

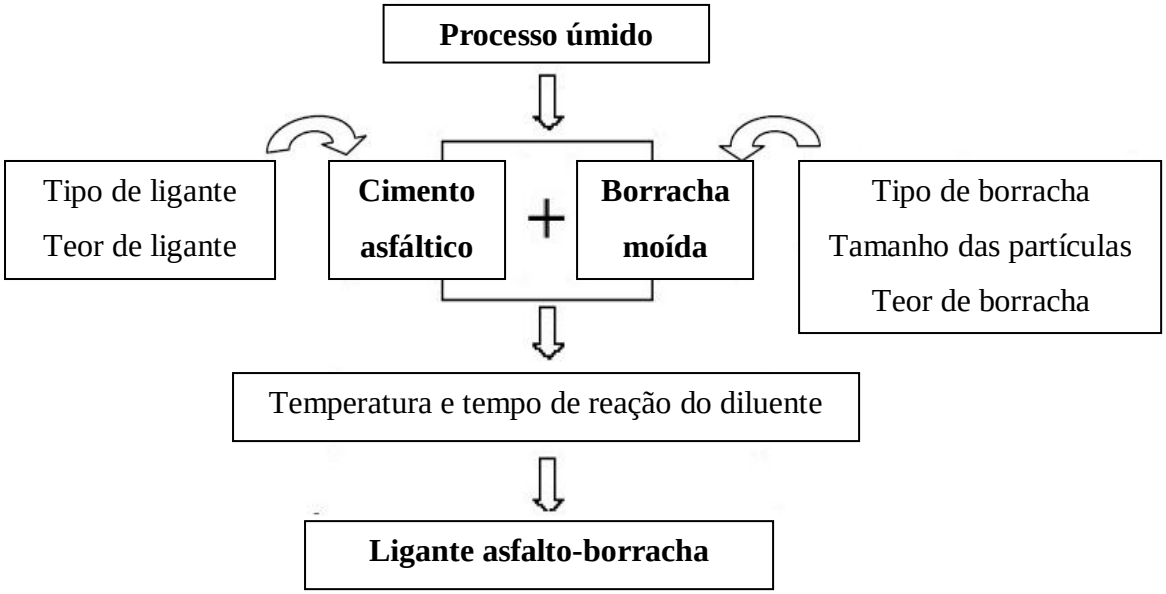
Fonte: MENDES; NUNES (2009, p. 48)

2.2.4 Produção do asfalto-borracha

O ligante asfalto-borracha, que é obtido pelo processo úmido, consiste na mistura do cimento asfáltico de petróleo (CAP) com porcentagem de 5 a 25% de borracha de pneus inservíveis moída, durante um período de tempo de 20 a 120 minutos e temperatura variando entre 150 e 200ºC. O resultado obtido é um ligante com propriedades reológicas diferentes do original, podendo ser otimizado com aditivos (MARTINS, 2004, p.32).

Segundo MARTINS (2004, p. 32) o grau de modificação do ligante depende de vários fatores: o tipo de pneu moído, a granulometria das partículas e a porcentagem de borracha, o cimento asfáltico utilizado e sua proporção, tempo e temperatura de reação, compatibilidade do ligante com a borracha, a energia mecânica durante a mistura e a reação e o uso de diluentes, como apresentado na FIG 12 a seguir.

FIGURA 12 – Esquema da produção do asfalto-borracha



Fonte: ODA (2000 *apud* MARTINS, 2004, p. 33)

2.2.5 Custo-benefício

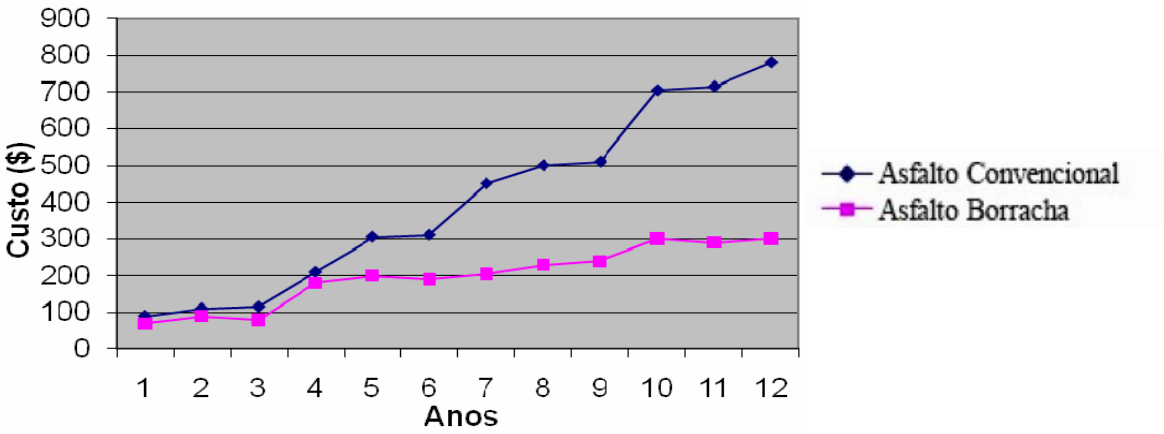
De acordo com algumas observações feitas ao longo das implantações do asfalto-borracha em obras viárias pôde-se observar que o custo de fabricação e aplicação final é de 30 a 40% superior à do asfalto convencional. Isto ocorre porque, para obter o ligante desejado, é necessário adicionar ao processo de fabricação a etapa da trituração e mistura do pó de borracha (MENDES; NUNES, 2009).

Para construir um quilômetro de asfalto-borracha os custos se encontram na faixa dos 117 mil reais, contra 90 mil reais do asfalto convencional. Porém, visto que a durabilidade do ligante com borracha pode atingir o dobro da durabilidade do convencional, sua aplicação acaba se tornando viável e os custos iniciais se diluem com o tempo (MENDES; NUNES, 2009).

Segundo SANCHES; GRANDINI e JUNIOR (2012) em consulta a tabela de custos da Prefeitura Municipal de Curitiba, no exercício de 2012, pôde-se observar que o custo de implantação do asfalto-borracha por metro quadrado é de R$ 77,22 contra R$ 46,66 do asfalto convencional.

Na FIG. 13 a seguir é possível observar o gráfico que mostra o custo de manutenção anual por quilômetro para o asfalto convencional e o asfalto-borracha, sendo que, logo no período de um ano de implantação, o asfalto-borracha já apresenta custos inferiores ao asfalto convencional, o que se torna ainda mais evidente com o passar dos anos.

FIGURA 13 – Gráfico de custo de manutenção dos asfaltos



Fonte: MENDES; NUNES (2009, p. 59)

2.2.6 Outras aplicações do asfalto-borracha

O asfalto-borracha tem sido utilizado, na maioria das vezes, como ligante para produção da camada de revestimento do pavimento, constituída, neste caso, por concreto betuminoso. Mas sua aplicação não se limita apenas à produção de novo revestimento, podendo ser aplicado também em atividades de reabilitação (remendo, selante de trincas e juntas), como tratamento superficial (SAM) e como transição entre pavimento existente e camada de reforço (SAMI) (MARTINS, 2004, p. 26).

2.2.6.1 Atividades de reabilitação

Para resolver problemas como espaçamento em remendos, trincas e juntas em um pavimento, seja ele asfáltico ou de concreto, o asfalto borracha apresenta ótima performance em relação a outros seladores que tendem a se desprender do pavimento em decorrência do tráfego pois possui característica aglutinante e flexibilidade. A FIG. 14 ilustra a aplicação do asfalto-borracha como selante de pavimento.

FIGURA 14 – Aplicação de asfalto-borracha em trincas no pavimento

Fonte: MARTINS (2004, p. 26)

2.2.6.2 Tratamento superficial

Conhecido como Stress Absorbing Membrane (SAM), do inglês “membrana de absorção de estresse”, consiste em aplicar uma camada de asfalto-borracha misturada com agregados sobre o pavimento existente, com a finalidade de evitar ou retardar o surgimento de trincas, dando uma proteção à superfície. Sua espessura irá depender da granulometria do agregado utilizado e pode ser vizualizada na FIG. 15 a seguir (MARTINS, 2004, p. 27).

FIGURA 15 – Aplicação da camada de tratamento superficial

Fonte: MARTINS (2004, p. 27)

2.2.6.3 Tratamento entre transição de camadas

No caso deste tratamento, conhecido como Stress Absorbing Membrane Interlayer (SAMI), do inglês “membrana de absorção de estresse entre camadas”, aplica-se uma camada delgada de asfalto-borracha entre o revestimento existente e a nova camada de reforço. Ela tem a finalidade de tornar a camada de revestimento impermeável, evitando que o solo abaixo seja prejudicado, assim como mostra a FIG. 16.

FIGURA 16 – Aplicação de SAMI

Fonte: MARTINS (2004, p. 28)

2.2.7 Ensaios laboratoriais

Para comparar a tecnologia do ligante asfalto-borracha com o ligante convencional a fim de serem obtidos parâmetros que comprovassem a superioridade do novo ligante, bem como adquirir dados técnicos, foram realizados ensaios de laboratório com simulador de tráfego em segmentos de pavimentos experimentais constituídos das duas tecnologias na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

> Foram aplicados mais de 98.000 ciclos de carga de eixo no asfalto convencional e aproximadamente 123.000 naquela com asfalto-borracha. Inicialmente aplicaram-se 2.000 ciclos com carga de eixo de 8,2tf, visando uma acomodação inicial do

> material, e a seguir, cargas de eixo de 10tf, que foram aplicadas até o final do ensaio em cada estrutura (Martins, 2004, p. 48).

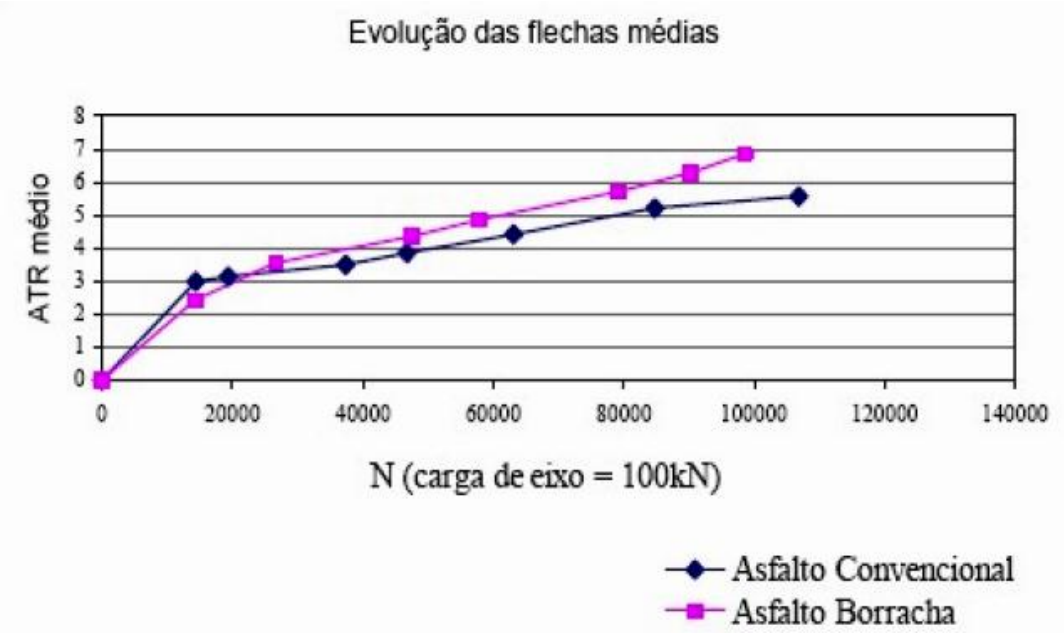
A seguir são apresentados os tipos de ensaios realizados, seus resultados e conclusões.

2.2.7.1 Deformação permanente do pavimento

A FIG. 17 a seguir mostra a evolução da deformação permanente do pavimento, conhecida também como afundamento das trilhas de roda (ATR).

O afundamento das trilhas de roda médio foi obtido com o uso de um perfilógrafo, aparelho capaz de medir a rugosidade de uma superfície, sendo os resultados coletados semanalmente para cada estrutura (MARTINS, 2004, p.51).

FIGURA 17 – Evolução do afundamento das trilhas de roda



Fonte: CERATTI; CRUZ e NUÑES (2004 *apud* MARTINS, 2004, p. 51)

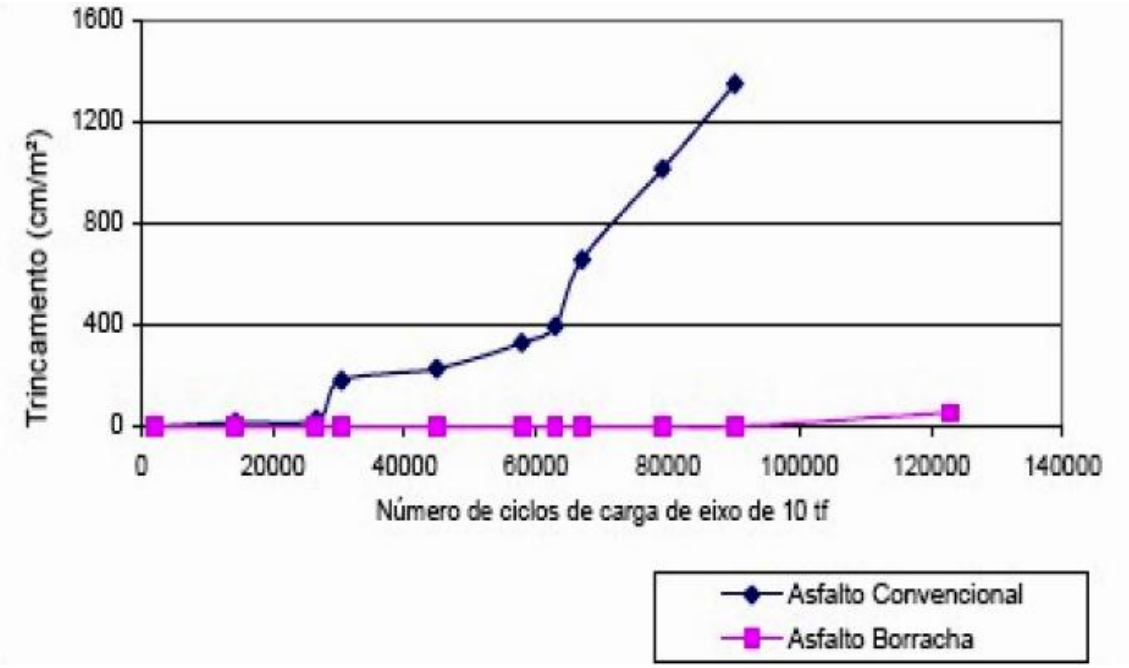
Os resultados entre o pavimento constituído de asfalto-borracha e asfalto convencional se mostraram próximos, sendo que asfalto convencional apresentou melhores resultados. Isto pode ter ocorrido devido ao fato de que os ensaios foram realizados em épocas distintas do ano, com temperaturas diferentes. O asfalto-borracha foi ensaiado em meses de primavera e início de verão e o asfalto convencional, no inverno (MARTINS, 2004, p. 51).

2.2.7.2 Reflexão de trincas

Este ensaio tem como objetivo observar a ocorrência de trincas na superfície de cada pavimento experimental e traçar um gráfico comparando os resultados, como mostrado na FIG. 18.

Neste caso o pavimento constituído por asfalto-borracha apresentou resultados muito superiores ao asfalto convencional.

FIGURA 18 – Resultados da evolução do trincamento dos pavimentos



Fonte: CERATTI; CRUZ e NUÑES (2004 *apud* MARTINS, 2004, p. 52)

No pavimento com asfalto convencional puderam ser observadas fissuras já aos 14.000 ciclos de carga, transformando-se posteriormente em trincas que tomaram conta de todo pavimento experimental (MARTINS, 2004, p. 53).

Já no caso do pavimento com asfalto-borracha, uma única trinca surgiu em cima de uma canaleta serrada para comportar os fios elétricos do equipamento, o que ocorreu apenas com 123.000 ciclos de carga (MARTINS, 2004, p. 53).

2.2.7.3 Resultados de ensaios com corpos de prova extraídos das trilhas experimentais

Foram extraídos corpos de prova cilíndricos das amostras dos pavimentos experimentais de asfalto convencional (AC) e asfalto-borracha (AR) para aplicação de carga

diametral vertical a fim de serem obtidos os valores de módulo de resiliência (MR) e resistência à tração por compressão diametral (RTCD), que são apresentados nas TAB. 2 e 3 a seguir (MARTINS, 2004, p. 53).

TABELA 2 – Módulos de resiliência e resistência à tração do asfalo convencional

CP (AC) – Trilha asfalto convencional	Módulo de Resiliência (kgf/cm²)	Resistência a tração por Compressão Diametral (kgf/cm²)	Relação MR/RTCD
1	65.810	6,27	10.496
2	69.500	7,06	9.644
3	43.990	7,31	6.018
4	29.880	7,32	4.082
5	37.300	7,71	4.838
6	49.290	7,71	6.393
Médias estatísticas	49.295	7,23	6.945

Fonte: CERATTI; CRUZ e NUÑES (2004 *apud* MARTINS, 2004, p. 53)

TABELA 3 - Módulos de resiliência e resistência à tração do asfalo-borracha

CP (AR) – Trilha asfalto-borracha	Módulo de Resiliência (kgf/cm²)	Resistência a tração por Compressão Diametral (kgf/cm²)	Relação MR/RTCD
1	43.720	6,62	6.604
2	39.200	6,38	6.144
3	46.850	6,37	7.355
4	29.810	8,03	3.712
5	22.330	6,88	3.246
6	32.440	8,10	4.005
Médias estatísticas	37.525	7,06	5.178

Fonte: CERATTI; CRUZ e NUÑES (2004 *apud* MARTINS, 2004, p. 54)

O módulo de resiliência é a carga máxima que o material em estudo pode ser submetido sem que ocorra deformação permanente em sua estrutura. Quanto maior o módulo de resiliência, mais rígido é o material (MARTINS, 2004).

A resistência a tração por compressão diametral tem como objetivo obter o valor máximo da carga que o material em estudo resiste a tração, sendo o ensaio feito por uma prensa que submete o corpo de prova a compressão diametral e gera o valor máximo no momento do rompimento (MARTINS, 2004).

Com os resultados obtidos pelos ensaios realizados nos corpos de prova pode-se observar que a média estatística do módulo de resiliência (MR) do asfalto-borracha (AR) é 31% inferior à do asfalto convencional (AC), ou seja, a mistura de asfalto-borracha apresenta menor rigidez em relação à mistura convencional. Como os valores de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) das duas misturas são aproximados, podemos concluir com a relação módulo de resiliência e resistência à tração (MR/RTCD) que a mistura de asfalto-borracha é 34% inferior à do asfalto convencional (MARTINS, 2004).

Segundo Martins (2004, p. 54) “este fato, do ponto de vista da mecânica, é muito interessante, já que o que se deseja é uma mistura tão flexível quanto possível, desde que a resistência à tração seja razoável”.

2.2.8 Vantagens sociais e econômicas do asfalto-borracha

Com o emprego da tecnologia do asfalto-borracha algumas vantagens socais e econômicas podem ser apontadas, entre elas:

- Redução do foco de doenças letais, como a dengue;
- Redução da poluição visual causada pelo depósito dos pneus inservíveis em locais inapropriados;
- Redução do assoreamento de rios, lagos e baías em decorrência do acúmulo de pneus nas margens;
- Redução do número de pneus descartados impropriamente em qualquer circunstância, reduzindo as chances de um incêndio;
- Redução do consumo de petróleo tanto por reduzir a quantidade de petróleo presente na mistura, já que parte desta é composta por borracha, quanto por prolongar a durabilidade da camada de revestimento, evitando constante manutenção;

2.2.9 Vantagens técnicas do asfalto-borracha

A seguir são indicadas algumas vantagens técnicas que são obtidas quando utilizada a tecnologia do ligante asfalto-borracha:

- Maior resistência a variações térmicas quando comparado com o ligante asfáltico convencional;
- Maior resistência a formação de trincas devido à borracha presente na mistura, que por possuir elastômeros, garante ao pavimento maior flexibilidade;
- Maior resistência ao envelhecimento por possuir antioxidantes e carbono presentes na composição da borracha;
- Resistência elevada ao aparecimento de deformação superficial permanente (trilhas de rodas) por possuir maior ponto de amolecimento.

Com base nas características apresentadas anteriormente, o ligante asfalto-borracha também apresenta as seguintes vantagens, de acordo com MARTINS (2004, p. 25):

- Redução na espessura da camada de revestimento do pavimento;
- Aumento da vida útil do pavimento;
- Maior segurança no uso da rodovia devido ao aumento na aderência do pneu com o asfalto;
- Redução do nível de ruído do tráfego entre 65 e 85%;
- Redução de aquaplanagem e do efeito “spray”, que consiste na formação de névoa sobre a rodovia.

2.3 Desvantagens do asfalto-borracha

Algumas desvantagens da tecnologia podem ser apontadas, sendo uma delas o custo inicial de implantação. Para construir um pavimento com asflato-borracha estima-se que os custos sejam de 30 a 40% mais altos em relação ao asfalto convencional, visto que para ser construído, o asfalto-borracha necessita do acrescimo da etapa da trituração da borracha e sua mistura com o ligante asfáltico (MARTINS, 2004, p. 66).

O processo de trituração da borracha exige mão de obra qualificada, novas instalações e equipamento, com controle rigoroso de qualidade, sendo esses muitas vezes

indisponíveis devido a falta de incentivo do governo e baixo nível de conhecimento sobre o assunto pelas construtoras.

Além disso, no país é utilizada a licitação de preços para realização de obras públicas, sendo um processo que define qual empresa irá atuar utilizando o critério de custos inicais, em vez de ser analisado o custo-benefício da implantação, deixando o asflato-borracha em segundo plano.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tema Asfalto-borracha, apresentado pelo trabalho, está em destaque na sociedade atual, visto que a necessidade de pavimentação e correta manutenção das rodovias é uma atividade constante.

A mistura do ligante asfáltico com o pó de borracha dos pneus inservíveis tem a capacidade de aumentar a durabilidade da camada de revestimento do pavimento e garantir mais segurança e conforto aos usuários da rodovia. Isto ocorre devido às características da borracha, que tornam o pavimento mais flexível e com maior aderência.

Além das vantagens técnicas trazidas pelo uso da tecnologia da mistura, o impacto ambiental é reduzido, visto que para produzir o pó de borracha são utilizados pneus inservíveis que seriam dispostos inadequadamente, causando sérios problemas ambientais.

Os custos para a produção e implantação do asfalto-borracha são mais altos que os do asfalto convencional, sendo necessário maquinário e novos processos para triturar e misturar a borracha no ligante asfáltico, mas são diluídos com o passar do tempo pela maior durabilidade, o que reduz a necessidade de constante manutenção.

Finalmente, o trabalho visa conscientizar a sociedade dos problemas causados pelo descarte inadequado dos pneus inservíveis e apresentar uma alternativa que, além de resolver parte do problema ambiental, garante um produto final de maior qualidade, resultando em mais conforto e segurança e redução de custos para manutenção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica:** materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007, 557 p.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção.** Rio de Janeiro: LTC, 2010, 960 p.

BRANCO, F.; PEREIRA, P.; SANTOS L. P. **Pavimentos Rodoviários.** Coimbra: Almedina, 2008, 388 p.

MARTINS, H. A. F. **A utilização da borracha de pneus na pavimentação asfáltica.** 2004. 101 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2004.

MENDES, C. B. A.; NUNES, F. R. **Asfalto borracha:** minimizando os impactos ambientais gerados pelo descarte de pneus inservíveis no meio ambiente. 2009. 73 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Faculdade Brasileira, Vitória, 2009.

MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório**. 2010. 299 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

ODA, S.; JÚNIOR, J. L. F. **Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação**. 2001. 11 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2001.

SALINI, R. B. **Utilização de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas.** 2000. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

SANCHES, F. G.; GRANDINI, F. H. B.; JUNIOR, O. B. **Avaliação de projetos com utilização do asfalto-borracha em relação ao asfalto convencional.** 2012. 73 p. Monografia (Bacharel em Engenharia de Produção Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2012.

SANTOS, R. M. **Efeito da adição de partículas de borracha de pneus nas propriedades físico-mecânicas de compósito cimentício**. 2012. 152 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del Rei, 2012.