

3 – REUTILIZAÇÃO DE PNEUS

3.1 – INTRODUÇÃO

O processo de vulcanização de borracha foi descoberto casualmente por Charles Goodyear, em 1839, ao deixar cair enxofre em uma amostra de borracha que estava sendo aquecida. Com isso, foi descoberto um material mais resistente e elástico, cuja demanda se multiplicou no mundo todo (GOODYEAR, 1999). Uma das principais aplicações da borracha vulcanizada sempre foi como pneu de veículos rodoviários.

Com o desenvolvimento da indústria automobilística no século XX, o consumo de pneus atingiu números estratosféricos. Cerca de 285 milhões de pneus, o equivalente a mais de 2 milhões de toneladas de borracha, são descartados anualmente nos Estados Unidos (Figura 3.1). No Brasil são colocados no mercado aproximadamente 61 milhões de pneus por ano, sendo que cerca de 38 milhões são resultados da produção nacional e 23 milhões são pneus reaproveitados (usados importados e recauchutados) (ANIP, 1996).

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 ar com uma fumaça altamente

tóxica e deixa um óleo que se infiltra e 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.

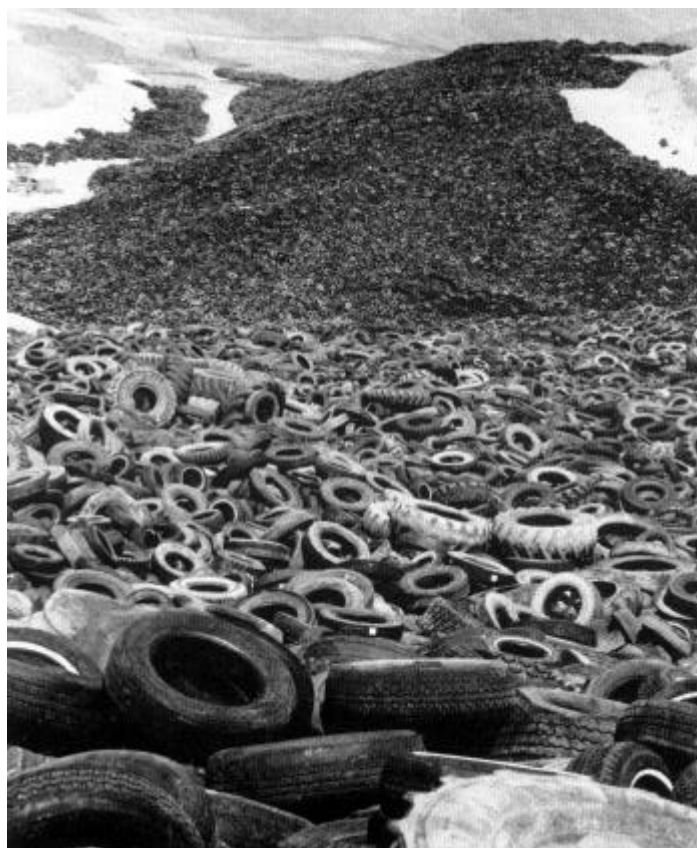


FIGURA 3.1 – Milhões de pneus descartados anualmente nos EUA
(ARPG, 1993)

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, 1992a). 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, 1996).

Na década de 80, nos Estados Unidos, grandes incêndios de pneus (Figura 3.2) 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 (DOTs) e a Agência de Proteção Ambiental (EPA), em cooperação, a desenvolver 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 com borracha de pneus descartados moída; em 1995, 10%; em 1996, 15% e a partir de 1997, 20% (EPPS, 1994).



FIGURA 3.2 – Incêndio de pneus nos Estados Unidos causa a contaminação do ar, da água e do solo

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 N^o258 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 N^o258, a partir de janeiro de 2002, produtores e importadores de pneus serão forçados a coletá-los e colocá-los em locais ambientalmente adequados. Além disso, a partir de 2005 começará a redução do passivo ambiental.

Independente do avanço de 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 (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 e *pelétes* emborrachados (FARRO, 1997).

O Departamento de Meio Ambiente e Uso de Solo da Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP) e do Centro das Indústrias do Estado de São Paulo (CIESP) promove, 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 etc., dentre outros, tentando minimizar o problema, utilizam os pneus descartados em obras de drenagem e na fabricação de tapetes de automóveis, solas de sapatos, tiras para estofados etc. (CEMPRE, 1998).

A geração de energia pela queima e a recauchutagem foram as primeiras formas de reutilização de pneus. Com o avanço tecnológico, surgiram novas aplicações, como a mistura com asfalto, considerada nos Estados Unidos como uma das melhores soluções para a disposição dos milhões de pneus descartados anualmente.

Nos últimos 40 anos, a melhoria das técnicas de manufatura aumentou muito a vida útil dos pneus. A recauchutagem, que no Brasil atinge 70% da frota de transporte de carga e passageiros, é outro importante meio para a redução desses resíduos, pois prolonga a vida dos pneus em 40%. Porém, a maior parte deles, quando desgastada pelo uso ou imprestável para novas recauchutagens, acaba parando nos lixões, na beira de estradas e rios (um exemplo é o Rio Tietê, em São Paulo-SP, Figura 3.3) e até no quintal das casas, onde acumulam água que atrai insetos transmissores de doenças (TUNES, 1998).



FIGURA 3.3 - Os pneus retirados do Rio Tietê, em São Paulo-SP, acumulam-se na margem (TUNES, 1998)

3.2 – ALTERNATIVAS PARA REUTILIZAÇÃO DE PNEUS

Os pneus são compostos aproximadamente por 30% (em peso) de aço, 20 a 26% de borracha sintética e 21 a 33% de borracha natural. Geralmente, um pneu com cerca de 9 kg fornece entre 4,5 a 5,5 kg de borracha (RUTH *et al.*, 1997). A Tabela 3.1 apresenta os componentes químicos de pneus de automóveis e caminhões.

TABELA 3.1 - Composição química de pneus de automóveis e caminhões

COMPONENTES (%)	BANDA DE RODAGEM		PNEUS INTEIROS	
	AUTOMÓVEL	CAMINHÃO	AUTOMÓVEL	CAMINHÃO
NEGRO DE FUMO	32,0	30,0	31,0	28,5
BORRACHA SINTÉTICA	37,0	23,0	26,0	21,0
BORRACHA NATURAL	5,0	27,0	20,0	33,0
SOLÚVEL EM ACETONA	21,0	16,0	19,0	12,5
SÍLICA	5,0	4,0	5,0	5,0

Fonte: HEIZTMAN, 1992b

Os pneus descartados inteiros podem ser utilizados em diversas aplicações, como por exemplo em obras de contenções, nas margens de rios para evitar desmoronamentos, na construções de quebra-mares, na construção de parques infantis, no controle de erosões, na drenagem de gases em aterros sanitários etc. No Brasil, as carcaças são reaproveitadas como estrutura de recifes artificiais no mar, visando o aumento da produção pesqueira.

A Figura 3.4 ilustra as principais formas de disposição e reutilização de pneus descartados, que são apresentadas a seguir.

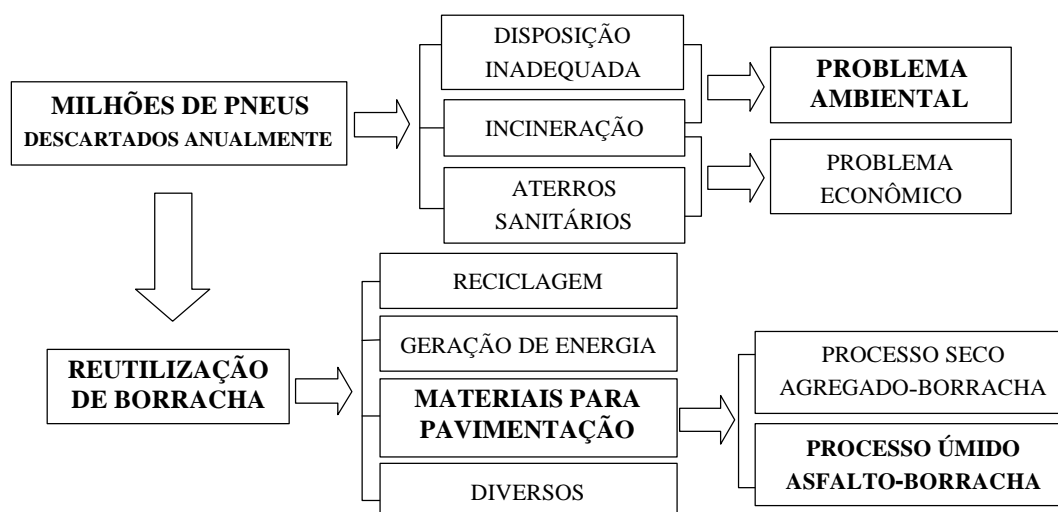


FIGURA 3.4 – Destino final de pneus descartados

3.2.1 – Reciclagem: fabricação de novos pneus e câmaras de ar

Apenas 10% das 300 mil toneladas de sucata de pneus disponíveis no Brasil para obtenção de borracha regenerada são de fato recicladas. A reciclagem de pneus é capaz de devolver ao processo produtivo um insumo regenerado por menos da metade do custo da borracha natural ou sintética, que é utilizado na fabricação de novos pneus e câmaras de ar. Além disso, economiza energia e poupa petróleo usado como matéria-prima virgem e até melhora as propriedades de materiais feitos com borracha (CEMPRE, 1998).

No Brasil, existe tecnologia em escala industrial para regeneração da borracha pelo processo a frio, obtendo um produto reciclado com elasticidade e resistência semelhantes às do material virgem. Além disso, essa técnica usa solventes capazes de separar o tecido e o aço dos pneus, permitindo seu reaproveitamento (CEMPRE, 1998).

Uma alternativa para reciclagem de borracha de pneus é dada pela empresa Relastomer Tecnologia e Participações S.A. (Anexo B). Os pneus velhos são cortados em lascas, transformados em pó de borracha e passados por um

sistema de peneiras, que permite a obtenção da granulometria desejada. Em seguida, passam por tratamento químico para possibilitar a desvulcanização da borracha. Em autoclaves giratórios, o material recebe o oxigênio, calor e elevada pressão, que provocam o rompimento de sua cadeia molecular. Assim, a borracha é passível de novas formulações. Ela sofre um refino mecânico, ganhando viscosidade, para depois ser prensada. No final do processo, o material ganha a forma de fardos de borracha regenerada. Eles são misturados com outros ingredientes químicos para formar uma massa de borracha que é moldada ao passar por uma calandra e um gabarito. Numa bateria de prensas, a borracha é vulcanizada, formando os produtos finais (CEMPRE, 1998). O produto obtido do processo Relastomer (borracha de pneus moída) pode ser empregado também em materiais asfálticos para pavimentação, como é o caso deste trabalho (mais detalhado no capítulo 4).

3.2.2 – Geração de energia através da queima de pneus

A queima a céu aberto, que gera fumaça negra de forte odor (dióxido de enxofre), é proibida em vários países, inclusive no Brasil (TUNES, 1998). Porém, a queima de pneus velhos em fornos controlados é uma alternativa rentável de reaproveitamento, pois cada pneu contém a energia de 9,4 litros de petróleo. No Brasil, calcula-se que são utilizados cerca de 500 mil pneus como combustível, proporcionando uma economia de 12 mil toneladas de óleo.

Segundo TUNES (1998), o melhor método para queimar os pneus sem que ocorra problema com a fumaça negra e poluente é o co-processamento, ou seja, a queima de resíduos industriais em fornos de cimento em que resíduos são usados para gerar energia. A queima de resíduos industriais a 1700°C transforma quimicamente as substâncias perigosas, fazendo com que as emissões de gases na atmosfera sejam menos poluentes. As cinzas resultantes

são incorporadas ao cimento e ficam encapsuladas em concentrações aceitáveis (TUNES, 1998).

No Brasil, empresas como a Pirelli e a Mercedes Benz, por exemplo, já estão economizando 50% no descarte de seus resíduos, enquanto os fabricantes de cimento economizam em combustível. Os principais usuários de pneus em caldeiras são as indústrias de papel e celulose e as fábricas de cal e cimento, que usam a carcaça inteira e aproveitam alguns óxidos contidos nos metais dos pneus radiais (TUNES, 1998).

3.2.3 – Diversos

A trituração dos pneus para uso na regeneração da borracha, mediante a adição de óleos aromáticos e produtos químicos desvulcanizantes, é um dos principais mercados para a reutilização desse material. Com a pasta resultante deste processo, as indústrias produzem tapetes de automóveis, solados de sapato, pisos industriais e borrachas de vedação, entre outros. Uma outra forma de reaproveitamento dos pneus é utilizar a borracha cortada em pedaços de 5 cm na aeração de composto orgânico (suporte estrutural). Essas partículas devem ser retiradas do adubo antes da sua comercialização.

3.2.4 – Incorporação em materiais asfálticos para pavimentação

Estima-se que 40% dos gastos públicos com rodovias sejam empregados em pavimentos. Considerando-se os custos para os usuários (consumo de combustível, desgaste de pneus e equipamentos), da ordem de 10 vezes maiores que os custos para os organismos rodoviários (construção, manutenção e restauração), tem-se que os custos totais da modalidade rodoviária podem representar de 2 a 17% do PIB de um país (PATERSON, 1991).

Portanto, no caso da utilização de pneus usados em obras de pavimentação, objeto de estudo deste trabalho e que será detalhado a seguir, além da redução significativa dos problemas ambientais, as pesquisas devem primeiro considerar os impactos sobre a qualidade dos pavimentos asfálticos, pois as rodovias representam grande parcela dos investimentos em transportes.

3.3 - REAPROVEITAMENTO DE PNEUS EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO

Em obras de pavimentação, a borracha de pneus pode ser incorporada aos materiais asfálticos através de dois processos: úmido e seco. No processo úmido, a borracha de pneus descartados moída (cerca de 5 a 25% do peso total de ligante) é incorporada ao ligante asfáltico antes de se adicionar o agregado. Quando da adição de borracha ao ligante asfáltico, ocorre reação entre os componentes e a alteração de suas propriedades. No processo seco, a borracha de pneus é misturada com o agregado antes de se adicionar o ligante asfáltico. As técnicas de produção de mistura para o processo seco são semelhantes a às utilizadas na produção de CAUQ convencional.

Apesar de algumas evidências de que misturas betuminosas executadas com adição de borracha picada têm suas propriedades melhoradas, o que pode ser verificado em vários trabalhos realizados nas décadas de 70, 80 e 90 (Tabela 3.2), não existem resultados conclusivos sobre o desempenho dos pavimentos a longo prazo. Muito precisa ainda ser pesquisado, não só mediante ensaios tradicionalmente utilizados, mas também com ensaios e conceitos considerados durante as pesquisas de materiais betuminosos do Programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) (ROMINE *et al.*, 1991; SOUSA *et al.*, 1994; BAHIA *et al.*, 1998).

TABELA 3.2 – Pesquisadores que avaliaram o ligante asfalto-borracha durante as décadas de 70, 80 e 90

PESQUISADORES	ANO
MORRIS e McDONALD	1976
COETZEE e MONISMITH	1979
HUFF e VALLERGA	1981
OLIVER	1981
ESCH	1982
JIMENEZ	1982
STEPHENS	1982
CHEHOVITS e MANNING	1984
JIMENEZ e MEIER, JR	1985
SHULER <i>et al.</i>	1985
ROBERTS e LYTTON	1987
TAKALLOU e HICKS	1988
ROGEE <i>et al.</i>	1990
SALTER e MAT	1990
HEITZMAN	1992a
HEITZMAN	1992b
KRUTZ e STROUP-GARDINER	1992
EPPS	1994
SHASHIDHAR e CHOLLAR	1994
LIANG e LEE	1996
MADAPATTI <i>et al.</i>	1996
ZAMAN <i>et al.</i>	1995
BILLITER <i>et al.</i>	1996
SHIH <i>et al.</i>	1996

3.4 – BREVE HISTÓRICO DA ADIÇÃO DE BORRACHA DE PNEUS MOÍDA EM MATERIAIS ASFÁLTICOS - PROCESSO ÚMIDO

Durante muitos anos, engenheiros e químicos trabalharam misturando borracha natural (látex) e borracha sintética (polímeros) em ligantes asfálticos na tentativa de melhorar as propriedades elásticas do ligante asfáltico. Mas é

só na década de 40 que se inicia a história da adição de borracha de pneus reciclada em materiais para pavimentação asfáltica com a Companhia de Reciclagem de Borracha, *U.S. Rubber Reclaiming Company*, que introduziu no mercado um produto composto de material asfáltico e borracha desvulcanizada reciclada, denominado Ramflex™. E, a partir da década de 80, a adição de borracha de pneus usados em misturas asfálticas passou a ser considerada, também, uma alternativa excelente para diminuir os problemas ambientais causados pela disposição de resíduos sólidos (Figura 3.5).



FIGURA 3.5 – Milhões de pneus dispostos inadequadamente

3.4.1 - DESENVOLVIMENTO DO ASFALTO-BORRACHA

Vários trabalhos publicados no *National Seminar on Asphalt-Rubber*, realizado pelo FHWA, em 1981, apresentam os aspectos históricos do desenvolvimento do asfalto-borracha.

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 (Figura 3.6) 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.

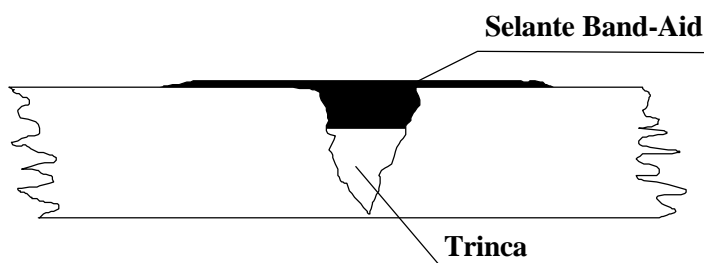


FIGURA 3.6 - Configuração de selante "band-aid" (Fonte: CRAFCO, 1980)

Em 1968, o Departamento de Transportes do Arizona (*Arizona Department of Transportation*, ADOT) construiu o primeiro pavimento usando o sistema *Stress Absorbing Membrane* (SAM), que consistia de um tratamento superficial com ligante asfalto-borracha. A maior dificuldade na utilização do produto estava na sua aplicação, pois mesmo aquecido o composto ficava muito viscoso para ser lançado com o distribuidor de asfalto convencional. Por esse motivo, para construir trechos grandes foi usada a máquina de lama

asfáltica para aplicar o asfalto-borracha. De 1968 a 1971 o estudo foi direcionado para aperfeiçoar o processo de aplicação e, em 1971, o ADOT construiu um trecho experimental de 21 quilômetros na *Interstate 40*, próxima a Winslow, onde foi adicionado querosene ao asfalto-borracha para facilitar sua aplicação.

A *Sahuaro Petroleum* e a *Asphalt Company* desenvolveram um tipo de asfalto-borracha para aplicar em capas selantes. Esse produto foi patenteado pela *Sahuaro Petroleum* e pela *Asphalt Company* como Overflex™.

O *Federal Highway Administration* (FHWA), desde o início da década de 70, tem contribuído para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de pesquisas sobre o uso de borracha de pneus moída em materiais para pavimentação asfáltica. Em 1971, foi publicado o trabalho *An Annotated Bibliography on Use of Rubber in Asphalt Pavements* (FHWA-RD-71-1), que contém um resumo de 86 projetos onde foi adicionada borracha de pneus em materiais para pavimentos asfálticos.

Em 1974, a Divisão de Projetos do FHWA, *Demonstration Projects Division*, iniciou um estudo sobre materiais para pavimentos asfálticos contendo borracha reciclada. O principal objetivo desse estudo foi incentivar o uso de asfalto-borracha na construção e manutenção de rodovias, uma vez que o produto apresentava características de desempenho superiores aos materiais convencionais quando comparados aos resultados de laboratório e de campo. Além disso, esperava-se que o aumento do uso de asfalto-borracha expandiria o mercado de borracha reciclada, cooperando com a redução do problema de disposição de resíduos causado por milhões de pneus de caminhões e automóveis descartados anualmente nos Estados Unidos.

Em 1975, a *Arizona Refining Company Inc.* (ARCO) desenvolveu um novo ligante, com 80% de ligante asfáltico e 20% de borracha moída, utilizando borracha reciclada desvulcanizada e óleo, ao invés de querosene, para diferenciar do produto da *Sahuaro*. Esse produto foi denominado de Arm-R-Shield™. Mais tarde (em 1985), as companhias fundiram-se em uma associação comercial conhecida como *Asphalt Rubber Producers Group* (ARPG). No entanto, a técnica ficou conhecida como Tecnologia McDonald. O principal resultado dos trabalhos desenvolvidos por McDonald, Arizona DOT, Sahuaro e ARCO foi que cerca de 35 estados americanos passaram a utilizar o asfalto-borracha em pavimentos.

No início de 1976, o FHWA anunciou oficialmente o uso de asfalto-borracha na construção de pavimentos asfálticos através do trabalho *Demonstration Project No. 37, The Use of Discarded Tires in Highway Construction*. Esse projeto incentivava os departamentos rodoviários a construir tratamentos superficiais (SAM) e camadas de reforços (SAMI) usando o ligante asfalto-borracha. Como parte da tentativa de divulgar essa nova técnica, o FHWA também forneceu recursos para a construção e avaliação de projetos experimentais, em virtude dos custos mais elevados (quando comparado ao material convencional). Com isso, 40 projetos foram construídos e avaliados pelo programa.

Como outra forma de tentar divulgar a técnica, congressos e conferências (como por exemplo, o *National Seminar on Asphalt-Rubber*, realizado pelo FHWA, em 1981 e 1989) enfatizavam a necessidade de maiores informações sobre aplicações, especificações, ensaios e formas de avaliação do uso de asfalto-borracha em pavimentos flexíveis, o que poderia ser alcançado com os resultados dos projetos desenvolvidos com o incentivo do próprio FHWA.

Dessa forma, algumas empresas e órgãos responsáveis pela infra-estrutura rodoviária demonstraram interesse em desenvolver essa nova técnica.

Em 1981, a “*Beugnet Company*” iniciou o uso de asfalto-borracha na França, misturando cerca de 10 a 30% de borracha com ligante asfáltico, a uma temperatura de 200°C. Este material foi patenteado com o nome de *Flexochape*. Os resultados da caracterização desse material foram: viscosidade alta (8 Poise a 200°C), ponto de amolecimento maior que 60°C, maior elasticidade, resiliência alta a baixas temperaturas e adesividade dez vezes maior que asfalto sem borracha a 20°C. Em 1985 foi feita uma modificação no processo de mistura, através da incorporação de um catalisador na mistura. Os resultados foram os seguintes: maior viscosidade, aumento na temperatura de ponto de amolecimento (de 15 a 20% dependendo do catalisador), manutenção por mais tempo das propriedades elásticas originais no ligante e maior adesividade.

Em 1983, a Divisão de Projetos do FHWA iniciou um trabalho experimental (*Experimental Projects No. 3, EP-3 - Asphalt Additives*), que tinha como objetivo principal o desenvolvimento de materiais asfálticos modificados com uso de aditivos para aplicar em obras de pavimentação asfáltica. Em 1986, o FHWA publicou o trabalho *Investigation of Materials and Structural Properties of Asphalt-Rubber Paving Materials* (FHWA-RD-86-027), onde foi apresentado o resultado das avaliações de campo de mais de 200 seções de testes, construídas entre 1977 e 1984.

Até o início da década de 90 já existiam cerca de 16.000 quilômetros de rodovias construídas com o asfalto-borracha. Em 1991, foi formulada a Lei sobre a Eficiência do Transporte Intermodal de Superfície (*Section 1038 - Intermodal Surface Transportation Efficiency Act - Public Law 102-240*)

que obrigava os Departamentos de Transportes e de Proteção Ambiental a desenvolverem estudos para utilizar borracha de pneus descartados em materiais para pavimentação.

No Brasil, na década de 90, o CENPES (Centro de Pesquisas da Petrobrás) começou a desenvolver pesquisas voltadas à área de materiais asfálticos modificados por polímeros, com o objetivo principal de estudar o desempenho desses materiais. Foram realizados, também, alguns experimentos com materiais asfálticos modificados por borracha de pneus moída, sendo desenvolvida uma pesquisa, com a UFSC, que tinha como objetivo comparar tipos de borracha de diferentes fornecedores e processos de produção. Outros estudos utilizando borracha de pneus moída estão sendo desenvolvidos em universidades e centros de pesquisas (como por exemplo, na UFRJ, UFRGS, UFSC, UEM e USP).

3.4.2 - VANTAGENS PREVISTAS COM A UTILIZAÇÃO DO LIGANTE ASFALTO-BORRACHA

Muitas são as vantagens previstas em função da incorporação de borracha de pneus usados a um cimento asfáltico. Merecem destaque:

- **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;
- **Aumento da flexibilidade** – misturas asfálticas com o ligante asfalto-borracha são mais flexíveis que as misturas asfálticas convencionais (STEPHENS, 1982; TAKALLOU e HICKS, 1988; McQUILLEN *et al.*, 1988), em virtude da maior concentração de elastômeros na borracha de pneus;

- **Aumento do ponto de amolecimento** - a adição de borracha faz com que o ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha aumente até 17°C em relação ao do ligante convencional (SALTER e MAT, 1990), o que significa um aumento da resistência ao acúmulo de deformação permanente nas trilhas de rodas;
- **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 comparados com pavimentos construídos com ligante asfáltico convencional (HEIZTMAN, 1992a, RUTH *et al.*, 1997).

3.4.3 - APLICAÇÃO DO LIGANTE ASFALTO-BORRACHA

O ligante asfalto-borracha tem sido aplicado em vários serviços de pavimentação, de selagem de trincas até um concreto asfáltico usinado a quente. Apesar da ocorrência de defeitos na superfície de rolamento, de uma maneira geral os resultados têm sido positivos. Os principais defeitos relatados são a exsudação e as trincas por contração de origem térmica, associados, principalmente, à 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 à mistura asfáltica.

Inicialmente, o ligante asfalto-borracha foi desenvolvido para ser usado em atividades de manutenção e 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 têm ficado restritas às atividades de reabilitação (remendo, selante de trincas e juntas), mas também têm sido utilizados em tratamento superficial (SAM), transição entre pavimento existente e camada de reforço (SAMI) e revestimento de concreto asfáltico. Apresenta-se, a seguir, uma síntese das principais formas de aplicação do ligante asfalto-borracha:

a) Selante de trincas e juntas (*asphalt-rubber crack/ joint sealant*)

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 Portland, sendo recomendado fazer a selagem com auxílio de um aplicador manual (Figura 3.7).



FIGURA 3.7 – Aplicador manual utilizado na selagem de trincas

(Fonte: CRAFCO, 1980)

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.

A escolha do tipo de selante varia de acordo com as características da região em que será feita a aplicação (volume de tráfego, clima etc.). Nos Estados Unidos, cerca de 80% dos estados, em todas as regiões, utilizam esse tipo de selante, com destaque para Arizona (Figura 3.8), Califórnia, Geórgia, Nebraska, New York, Pennsylvania, Texas e Wisconsin. O custo desse tipo de selante varia de 0,45 a 0,65 US\$/kg (HEIZTMAN, 1992a).



FIGURA 3.8 – Aplicação de selante de trincas no Estado do Arizona
(Fonte: CRAFCO, 1980)

b) 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 (Figura 3.9). A espessura de asfalto-borracha depende da granulometria do agregado, variando de 6 a 9 mm (HICKS *et al.*, 1995).



FIGURA 3.9 – Execução de um SAM (Fonte: ALL STATES ASPHALT Inc., 1999)

A distribuição dos materiais é feita de maneira similar à de qualquer tratamento superficial, sendo que normalmente aplica-se cerca de $2,7 \text{ l/m}^2$ de asfalto-borracha (diluído) e 19 kg/m^2 de agregados. As principais vantagens do uso de asfalto-borracha em tratamentos superficiais residem na maior susceptibilidade térmica e na maior elasticidade, que resultam em maior resistência as tensões provocadas pelo tráfego, particularmente as que resultariam em trincas por reflexão (daí o nome SAM) e por variações climáticas (HEIZTMAN, 1992a).

c) 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 (Figura 3.10), para retardar o desenvolvimento de trincas por reflexão e reduzir a penetração de água em camadas subjacentes (HICKS *et al.*, 1995). Existem dois tipos de SAMI: um composto por duas camadas e outro composto por três camadas. O SAMI com duas camadas consiste no lançamento de um

SAMI entre o pavimento existente e cerca de 25 a 75 mm de uma camada de reforço de CAUQ. Um SAMI com três camadas consiste em primeiro lançar uma camada de nivelamento de CAUQ, seguida pelo SAMI, sobre o qual é colocada uma camada de reforço de CAUQ com cerca de 25 a 75 mm. Geralmente, o SAMI com três camadas é executado quando o pavimento apresenta problemas de trincas ou quando o recapeamento é sobre um pavimento rígido. Durante o processo de construção, deve-se tomar o cuidado para que o diluente adicionado ao asfalto-borracha evapore antes do lançamento da camada de reforço.

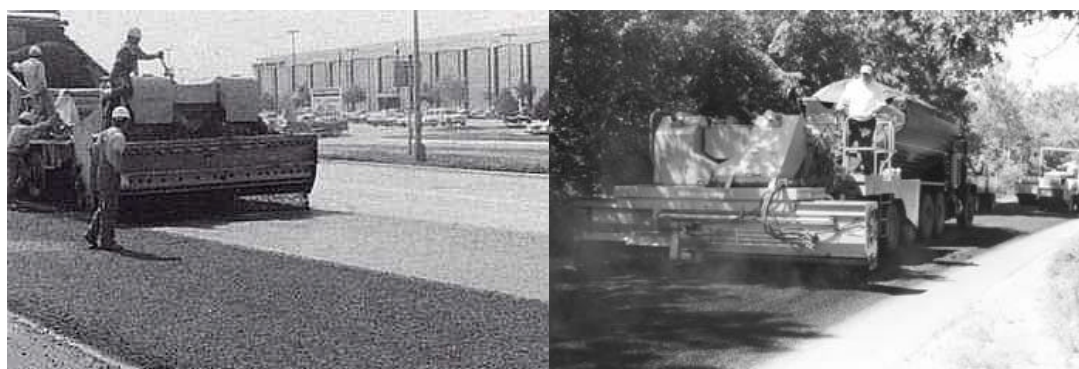


FIGURA 3.10 – Execução de um SAMI (Fonte: ALL STATES ASPHALT Inc., 1999)

d) Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ)

O uso do ligante asfalto-borracha em misturas asfálticas de graduação densa, em substituição ao ligante asfáltico convencional, reduz o acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda, as trincas por fadiga e as trincas por contração de origem térmica (TAKALLOU e SAINTON, 1992). O teor de borracha utilizado no asfalto-borracha varia de 5 a 25% do peso total de ligante asfáltico. Segundo a tecnologia inicialmente proposta por McDonald (BAKER RUBBER Inc., 1988), que não é a única (conforme será visto no capítulo 4), mas que permite o entendimento dos principais fatores intervenientes, 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 3.3.

TABELA 3.3 - Granulometria da borracha recomendada para misturas asfálticas de graduação densa

PENEIRA	% QUE PASSA
Nº 10	100
Nº 16	98 - 100
Nº 30	70 - 100
Nº 50	10 - 40
Nº 200	0 - 6

A principal diferença entre a produção de uma mistura asfáltica com ligante asfalto-borracha e uma mistura asfáltica convencional é a pré-mistura (reação da borracha com o ligante asfáltico) para produzir o ligante asfalto-borracha (Figuras 3.11 e 3.12). 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 asfáltico 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 construção de pavimentos contendo mistura asfáltica com ligante asfalto-borracha é bem parecida com a construção de pavimentos com mistura convencional. A temperatura do ligante asfalto-borracha deve estar entre 160 e 190°C. A temperatura de mistura varia entre 145 e 160°C, a temperatura de lançamento é geralmente mais alta e a compactação deve ser realizada enquanto o material está quente, pois a viscosidade do ligante asfalto-borracha aumenta rapidamente. Não devem ser utilizados rolos pneumáticos na compactação da camada.



FIGURA 3.11 – Exemplo de usina de asfalto-borracha no Estado da Flórida

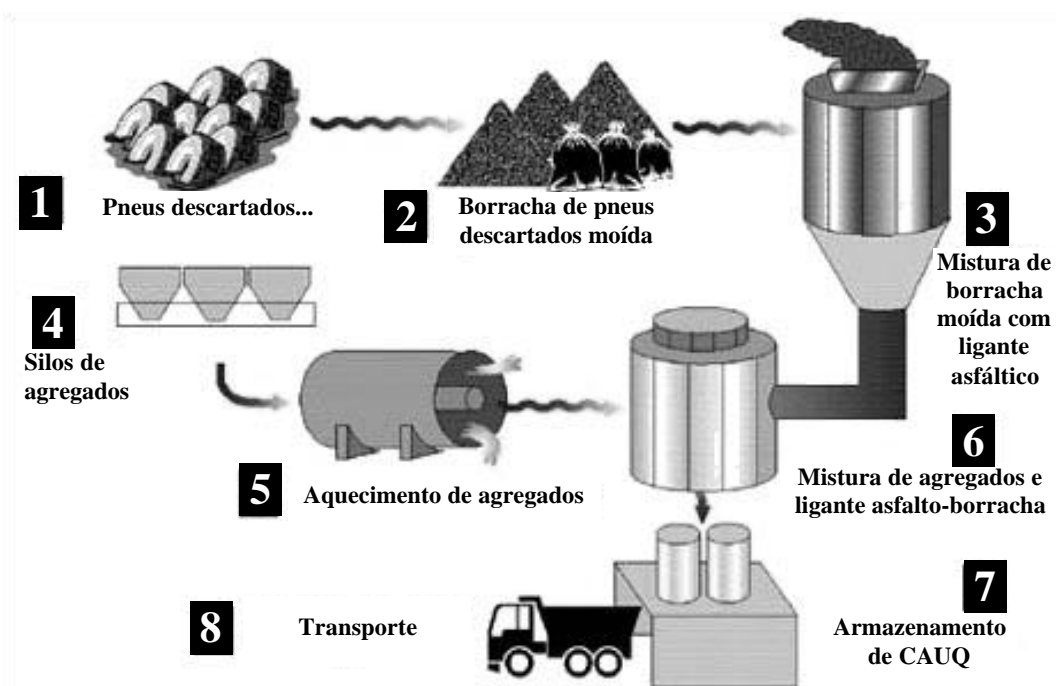


FIGURA 3.12 – Esquema de produção de concreto asfáltico com asfalto-borracha