

1 – INTRODUÇÃO

O pavimento é uma estrutura em camadas construída sobre uma fundação, denominada de subleito. De modo geral, as camadas mais próximas da superfície têm melhores características e custos mais elevados. Do ponto de vista estrutural a camada mais importante 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.

Do ponto de vista funcional, o pavimento tem a tarefa de suportar o tráfego e fornecer aos usuários segurança, conforto e economia. Essa função está intimamente relacionada com o estado da superfície de rolamento. A evolução das condições de rolamento, por sua vez, depende das intempéries, do tráfego e também das características estruturais do pavimento.

No caso dos pavimentos flexíveis, o revestimento, geralmente, é formado pela combinação de ligante asfáltico e agregado mineral (mistura asfáltica), podendo conter ainda material de preenchimento (filler mineral), aditivos etc. O ligante pode ser um cimento asfáltico ou um cimento asfáltico modificado e suas principais funções são: atuar como um elemento de ligação, colando as partículas minerais; e agir como um agente impermeabilizante da mistura.

Uma mistura asfáltica deve ser resistente ao impacto e tenaz. O desempenho de uma mistura, como por exemplo, o concreto asfáltico usinado a quente, CAUQ (também denominado concreto betuminoso usinado a quente, CBUQ), depende tanto das propriedades de seus componentes individuais quanto da relação entre ligante e agregado.

Devido a sua natureza viscoelástica, um ligante asfáltico apresenta grande variação da consistência quando submetido a diferentes temperaturas, o que pode influenciar o desempenho do pavimento. Para evitar que ocorram problemas, como por exemplo, deformação permanente devido a baixa consistência sob elevadas temperaturas e formação de trincas devido a alta rigidez sob baixas temperaturas, é importante conhecer a susceptibilidade térmica do ligante asfáltico ou, melhor ainda, o seu comportamento reológico.

Dentre os defeitos que ocorrem nos pavimentos flexíveis, dois se destacam: as trincas por fadiga do revestimento e o acúmulo de deformações permanentes nas trilhas de roda. As trincas por fadiga (Figura 1.1) ocorrem devido às cargas repetidas do tráfego e, também, devido a falta de flexibilidade ou elasticidade no componente asfáltico do pavimento, que não consegue suportar (“responder”) as solicitações do tráfego pesado sem trincar.



FIGURA 1.1 - Trincas por fadiga do revestimento asfáltico (Fonte: FERNANDES, JR. *et al.*, 1999)

A deformação permanente nas trilhas de roda (Figura 1.2) é um tipo de distorção que se manifesta sob a forma de depressões longitudinais, sendo decorrente da densificação dos materiais ou, principalmente, de ruptura por cisalhamento. A resistência ao cisalhamento de uma mistura asfáltica depende da estrutura de agregados, mas também depende das características de rigidez do ligante asfáltico.



FIGURA 1.2 - Deformação permanente nas trilhas de roda (Fonte: FERNANDES, JR. *et al.*, 1999)

A importância dos ligantes asfálticos para o desempenho dos pavimentos flexíveis tem levado ao uso de 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.

Durante muito tempo os asfaltos modificados foram caracterizados por métodos e controles tecnológicos convencionais que não refletem todos os benefícios desses materiais, porque são baseados em métodos empíricos que não quantificam as propriedades de engenharia (propriedades fundamentais dos ligantes). Ou seja, os ensaios tradicionais (penetração, ponto de amolecimento, ductilidade) não conseguem avaliar os efeitos dos modificadores sobre o comportamento reológico dos ligantes asfálticos.

Os ensaios desenvolvidos durante o Programa de Pesquisa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) e organizados dentro do método SUPERPAVE (*Superior Performance Pavement*) consideram as principais variáveis reológicas (tensão, deformação, tempo de carregamento e temperatura) e têm sido utilizados para caracterizar as propriedades fundamentais dos ligantes asfálticos.

A classificação, a caracterização e, principalmente, a seleção do tipo de ligante a ser utilizado no pavimento através de ensaios baseados apenas na consistência a uma determinada temperatura não consegue prever o comportamento de materiais asfálticos no campo. Desta forma, podem ocorrer graves insucessos quando as condições em serviço, para as quais uma determinada mistura está sendo dimensionada, forem diferentes das condições para as quais o método foi desenvolvido, mesmo se o dimensionamento seguir corretamente as recomendações normalizadas.

A evolução tecnológica da modalidade rodoviária com veículos mais pesados e solicitações dos pavimentos cada vez mais acentuadas, principalmente em termos de carga por eixo, pressão dos pneus e tipos de rodagem, aliada à necessidade de utilização de materiais não-convencionais e/ou menos nobres, também ressaltam as limitações inerentes dos métodos tradicionais para avaliar solicitações e materiais diferentes daqueles que existiam quando os métodos empíricos foram desenvolvidos.

1.1 - OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade técnica da utilização de borracha de pneus descartados moída em materiais para pavimentação asfáltica. Dentre as informações necessárias à avaliação da adição de borracha de pneus em materiais asfálticos destacam-se o método de incorporação da

borracha ao ligante (processo úmido), os fatores que podem influenciar o desempenho das misturas asfálticas (tipo, teor e granulometria da borracha, tipo e teor de asfalto, tempo de reação e temperatura de mistura) e os ensaios utilizados na avaliação das propriedades físicas, químicas e reológicas das misturas (ensaios tradicionais e ensaios do método Superpave).

O processo utilizado para produzir as misturas consiste no processo úmido, onde a borracha de pneus moída é incorporada ao ligante asfáltico antes da adição do agregado. O produto obtido do processo úmido é denominado de asfalto-borracha (*asphalt-rubber*).

Os objetivos da adição de borracha de pneus usados em ligantes asfálticos e misturas betuminosas são:

- minimizar o problema da disposição de pneus usados, pois em aterros sanitários ocupam muito espaço e, quando dispostos em locais inadequados, causam problemas ambientais e de saúde pública por facilitar a procriação de insetos e outros vetores de doença;
- melhorar o desempenho dos pavimentos mediante aumento na rigidez a elevadas temperaturas (reduzindo a deformação permanente nas trilhas de roda), aumento na flexibilidade (retardando o aparecimento de trincas), aumento na impermeabilização proporcionada pelos revestimentos asfálticos e utilização como selante de trincas existentes.

Este trabalho foi norteado por algumas perguntas: Quais os métodos existentes para misturar borracha de pneus e asfalto? Quais as características dos materiais (borracha e asfalto) que mais afetam a mistura e as propriedades do ligante produzido? Como escolher a porcentagem ótima de borracha a ser

incorporada ao ligante asfáltico? Quais os ensaios necessários para avaliar o ligante asfalto-borracha?

E, para atingir o objetivo principal, procurou-se:

- avaliar a utilização de materiais recicláveis (pneus, particularmente) em materiais asfálticos através de ensaios empíricos tradicionais e de ensaios desenvolvidos no Programa SHRP e utilizados no método Superpave;
- comparar o desempenho de ligantes asfálticos sem e com adição de borracha de pneus, através da avaliação de propriedades fundamentais, relacionadas com o desempenho em campo, e verificar se a adição de borracha de pneus em materiais asfálticos pode aumentar a resistência à formação de defeitos, particularmente deformação permanente e trincas por fadiga;
- avaliar o ligante asfalto-borracha e identificar os fatores que influenciam o seu desempenho;
- desenvolver modelos estatísticos para todas as propriedades medidas (penetração, ponto de amolecimento, ponto de fulgor, módulo de cisalhamento complexo, ângulo de fase e viscosidade Brookfield) em função dos fatores selecionados.

1.2 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em 7 capítulos. O **Capítulo 2** apresenta um estudo sobre as características e comportamento dos materiais asfálticos (propriedades reológicas) quando submetidos a diferentes carregamentos e temperaturas, durante um determinado período de tempo.

O **Capítulo 3** trata da revisão bibliográfica sobre as várias formas de utilização da borracha de pneus usados (inclusive reciclagem), enfatizando a sua aplicação em obras de pavimentação asfáltica. Aborda também, os principais aspectos do grave problema ambiental que representam os pneus descartados.

O **Capítulo 4** aborda o processo de produção do ligante asfalto-borracha, denominado de processo úmido e consiste em uma mistura de borracha e cimento asfáltico, a uma temperatura elevada (entre 150 e 200°C), durante um determinado período de tempo (entre 20 e 60 minutos). São identificados os principais fatores intervenientes, analisando-se como eles interferem no processo.

O **Capítulo 5** apresenta a programação fatorial de ensaios, desenvolvida para determinar a influência de alguns fatores sobre o desempenho do ligante asfalto-borracha. Para tanto, são considerados como variáveis dependentes os resultados dos ensaios tradicionais (penetração, ponto de fulgor e ponto de amolecimento), assim como resultados dos principais ensaios do método Superpave (viscosidade Brookfield, cisalhamento dinâmico, envelhecimento de curto e longo prazo e rigidez à fluência na flexão).

O **Capítulo 6** apresenta os resultados e a análise estatística dos resultados dos ensaios realizados no laboratório, em que as amostras de ligante asfalto-borracha foram submetidas aos ensaios tradicionais utilizados para caracterização de materiais asfálticos, assim como aos ensaios Superpave. Os resultados da análise estatística são apresentados em forma de tabelas, gráficos e, principalmente, modelos estatísticos de comportamento das variáveis dependentes em função dos fatores significativos.

O **Capítulo 7** apresenta as principais conclusões e os comentários finais, assim como sugestões para trabalhos futuros.