

Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação

Sandra Oda^{1*} e José Leomar Fernandes Júnior²

¹Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. ²Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13566-590, São Carlos, São Paulo, Brasil. *Author for correspondence. e-mail: soda@uem.br

RESUMO. Este trabalho apresenta estudo sobre a incorporação de borracha de pneus em ligantes asfálticos utilizados em obras de pavimentação. Trata-se de uma alternativa para solucionar um grave problema ambiental, pois no Brasil, anualmente, são descartados mais de 30 milhões de pneus, dos quais a maior parte é disposta em locais inadequados, servindo para a procriação de vetores de doenças e representando risco de contaminação do meio-ambiente. Os efeitos dos principais fatores que condicionam o comportamento do ligante asfalto-borracha (teor e granulometria da borracha, temperatura de mistura, tempo de reação) são avaliados através de ensaios tradicionais de caracterização de ligantes asfálticos e ensaios do Método Superpave, diretamente relacionadas ao desempenho dos pavimentos no campo. Os resultados da análise estatística evidenciam o efeito preponderante do teor de borracha e, principalmente, que o ligante asfalto-borracha pode aumentar a resistência ao acúmulo de deformação permanente e ao aparecimento de trincas por fadiga do revestimento.

Palavras-chaves: asfalto-borracha, borracha de pneus, ligante asfáltico, Superpave, processo úmido.

ABSTRACT. *Scrap tire rubber as modifier of asphalt cement for use in road paving.* This work presents the results of a research on the technical feasibility of the use of asphalt-rubber binder by the asphalt paving industry. In Brazil more than 30 million tires a year are disposed of, mostly in inadequate sites, causing serious health and environmental problems. The effects of the main factors (rubber content, rubber particle size, temperature of mixture, reaction time) on the behavior of asphalt-rubber binders are evaluated by traditional and Superpave Method tests, the latter based on certain fundamental properties directly related to field performance. Results of the statistical analysis of the factorial design of laboratory experiments show the most significant effect of rubber contents, or rather, that asphalt-rubber binder may increase the resistance against permanent deformation and fatigue cracking.

Key words: asphal-rubber; tire rubber; asphalt binder; Superpave, wet process.

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.

Cerca de 285 milhões de pneus, o equivalente a mais de 2 milhões de toneladas de borracha, são descartados anualmente nos Estados Unidos (Figura 1). Segundo a Associação Nacional de Indústria de Pneumáticos (ANIP), 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) (Geipot, 2000).

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 (Figura 2), 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.



Figura 1. Milhões de pneus descartados anualmente nos EUA (ARPG, 1993)

Unidos (cerca de 65% do total, o que equivale a 188 milhões de pneus por ano) é disposta de forma inadequada, gerando graves problemas (Figuras 3 e 4). Dessa forma, estima-se que haja um passivo ambiental de 2 a 3 bilhões de pneus (Heitzman, 1992). No Brasil, estima-se que pelo menos 50% dos pneus produzidos anualmente estão sendo descartados e dispostos em locais inadequados e que o passivo ambiental seja superior a 100 milhões de pneus (Geipot, 2000).



Figura 3. Pneus descartados na beira de estrada (Arts, 2001)



Figura 2. Incêndio de pneus nos Estados Unidos causa a contaminação do ar, da água e do solo

Por outro lado, a trituração, que resolveria o problema da compactação, é um processo caro. A maior parte dos pneus descartados nos Estados



Figura 4. Os pneus retirados do Rio Tietê, em São Paulo-SP, acumulam-se na margem (Tunes, 1998)

Nos Estados Unidos, depois de grandes incêndios de pneus que causaram a contaminação do ar, da água e do solo, surgiu o interesse no desenvolvimento de pesquisas visando à 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,

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 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, não existem resultados conclusivos sobre o desempenho dos pavimentos em 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).

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 iniciou 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™.

Em 1963, Charles H. McDonald, considerado o pai do sistema asfalto-borracha (*asphalt-rubber*) nos Estados Unidos, trabalhando para a *Sahuaru Petroleum*, iniciou uma pesquisa com o intuito de desenvolver, com a incorporação de borracha moída, um material “altamente elástico” para ser aplicado na manutenção da superfície de pavimentos asfálticos. Suas pesquisas resultaram no desenvolvimento de um produto composto de ligante asfáltico e 25% de borracha de pneu moído, misturados a uma temperatura de 190°C durante 20 min, para ser utilizado em remendos. Esse produto, denominado “band-aid”, foi utilizado também como selante de trincas e como camada de reforço (através do processo denominado *Stress Absorbing Membrane Interlayer*, SAMI).

A primeira aplicação foi feita em uma rua na cidade de Phoenix, onde se pôde verificar que, após seis anos, o pavimento não apresentava a formação de trincas por reflexão. McDonald continuou seu

trabalho experimental na cidade de Phoenix, juntamente com a empresa *Atlas Rubber Inc.*, onde foram construídos trechos no *Phoenix Sky Harbor International Airport*, em 1966.

A partir da década de 80, a adição de borracha de pneus usados em misturas asfálticas passou a ser considerada também uma alternativa excelente para diminuir os problemas ambientais causados pela disposição de resíduos sólidos (Figura 6). 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.



Figura 6. Milhões de pneus dispostos inadequadamente (ARTS, 2001)

No Brasil, na década de 90, o CENPES (Centro de Pesquisas da Petrobrás) e algumas universidades começaram a desenvolver pesquisas voltadas à área de materiais asfálticos modificados por polímeros e borracha de pneus descartados, com o objetivo principal de estudar o desempenho desses materiais. Os resultados obtidos foram publicados em teses de doutorado (Leite, 1999; Oda, 2000). Atualmente, outros estudos utilizando borracha de pneus moída estão sendo desenvolvidos em universidades e centros de pesquisas (como por exemplo, na UEM, EESC/USP, UFRGS e UFC).

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 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, 1992, Ruth *et al.*, 1997).
- 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 (Hicks *et al.*, 1995).
 - SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*): é uma camada de asfalto-borracha aplicada entre camadas de CAUQ (existentes e de reforço) quando da execução de uma reabilitação, para retardar o desenvolvimento de trincas por reflexão e reduzir a penetração de água em camadas subjacentes (Hicks *et al.*, 1995).
 - 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 Sainon, 1992).

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. As principais formas de aplicação do ligante asfalto-borracha são:

- selante de trincas e juntas (*asphalt-rubber crack/joint sealant*): 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.

Material e métodos

Mistura asfalto-borracha (processo úmido)

O processo úmido consiste da mistura de cimento asfáltico e borracha moída (5 a 25% do peso total de ligante - asfalto mais borracha) a uma temperatura elevada (150 a 200°C), durante um determinado período de tempo (20 a 120 min). Essa mistura é classificada como uma reação e forma um composto chamado asfalto-borracha (*asphalt-rubber*), com propriedades reológicas diferentes do ligante original, podendo ainda ser incorporados aditivos para ajustar a viscosidade da mistura (diluentes). O grau de modificação do ligante depende de vários fatores, incluindo o tamanho e a textura da borracha, a proporção de cimento asfáltico e borracha, o tempo e a temperatura de reação, a compatibilidade do ligante com a borracha (polaridades), a energia mecânica durante a mistura e reação e o uso de aditivos. Neste trabalho, não são considerados os fatores energia mecânica, tipo de borracha e diluente, pois se utiliza um único agitador, adquirido exclusivamente para esta pesquisa, um único tipo de borracha (polar) e não são utilizados aditivos. Os materiais utilizados nas misturas são borracha de pneus descartados moída e cimento asfáltico de petróleo.

Borracha de pneus

A borracha utilizada no ligante asfalto-borracha pode ser proveniente de pneus de automóveis ou caminhões. Geralmente, pneus de automóveis são compostos por cerca de 16 a 20% de borracha natural e de 26 a 31% de borracha sintética, enquanto pneus de caminhões são compostos por cerca de 31 a 33% de borracha natural e de 16 a 21% de borracha sintética. Por exemplo, um pneu de veículo de automóvel típico, com peso aproximado de 10,5 kg, apresenta, em relação ao peso total do pneu, 27% de borracha sintética, 20% de borracha natural, 25% de negro-de-fumo, 14% de produtos químicos (óleos, pigmentos et.), 10% de aço e 4% de poliéster e náilon (Goodyear, 1999). Discutem-se, a seguir, os fatores relacionados à borracha que são considerados neste trabalho.

a) Tipo de borracha

A borracha utilizada neste trabalho foi fornecida pela Relastomer S.A., cujo processo mistura borracha de pneus de automóveis e caminhões e tem como característica básica recuperar borrachas vulcanizadas a baixas temperaturas (máximo de 80°C). O processamento, dessa forma, ocorre na fase líquida, através de um catalisador heterogêneo, sendo a separação da borracha e do aço feita por filtração e magnetismo. O produto gerado (borracha em pó) apresenta alta homogeneidade e mantém muitas das propriedades físicas da composição original. A borracha utilizada é composta por moléculas polares, que no modelo molecular dos asfaltos (Asphalt Institute, 1995) formam a estrutura que fornece as propriedades elásticas e que são envolvidas pelas moléculas apolares, que contribuem para as propriedades viscosas.

b) Tamanho das partículas de borracha

A granulometria da borracha pode variar com o processo de produção, principalmente em função dos equipamentos e da temperatura de moagem (Heiztman, 1992). A borracha utilizada neste trabalho é composta de partículas que passam na peneira #40 (0,42 mm) e ficam retidas na peneira #100 (0,150 mm), divididas em duas frações: uma, composta de partículas que passam na peneira #40 e ficam retidas na peneira #50 (0,297 mm), denominada neste trabalho de #40, e outra, composta de partículas que passam na peneira #50 e ficam retidas na peneira #100, denominada de # 50.

c) Teor de borracha

Segundo Page *et al.* (1992), o teor de borracha em camadas de revestimento densas é de cerca de 5% de borracha passada na peneira #80 (0,178 mm), enquanto que em camadas de revestimento com

granulometria aberta o valor mais utilizado é de 12% de borracha passada na peneira #40. Em aplicações de ligante asfalto-borracha entre a camada de revestimento existente e a camada de reforço, podem-se adotar teores mais elevados, de até 20% de borracha passada na peneira #20 (0,84 mm), a uma taxa de cerca de 2,7 l/m².

Ligante asfáltico

No Brasil, os asfaltos são classificados pelo ensaio de penetração (CAP 30/45, CAP 50/60 e CAP 85/100) ou pelo ensaio de viscosidade (CAP 7, CAP 20 e CAP 40), e os números indicam, respectivamente, a penetração (em 1/10 mm) e o valor mínimo para a viscosidade a 60°C (em 10² Poise).

Neste trabalho, utilizou-se o CAP 20, que é o ligante asfáltico mais empregado nas obras de pavimentação no Estado de São Paulo. O material apresenta as seguintes características: ponto de amolecimento de 51°C, ponto de fulgor de 289°C e penetração de 41,7 (1/10 mm). Como o teor de ligante varia de acordo com o teor da borracha, uma vez que a quantidade de ligante será o complemento da porcentagem de borracha, neste trabalho adotam-se os teores de ligante de 94, 88, 82 e 76%. Alguns ensaios realizados na Universidade da Flórida, em Gainesville, utilizaram CAP 30 (Ruth *et al.*, 1997).

Equipamentos

Para realizar as misturas de asfalto com a borracha, utilizou-se um agitador mecânico indicado para produtos viscosos, marca FISATOM (modelo 722D), com potência de 255 W, 60 Hz, com controle de rotação variando de 530 a 2000 rpm, haste de 600 mm de comprimento e hélice tipo naval de diâmetro de 80 mm. O recipiente para colocar a mistura consistiu em uma panela elétrica de cerâmica com controle de temperatura (até 200°C).

Ensaio realizados

Ensaio tradicionais

Para qualificar os diferentes tipos e garantir um desempenho satisfatório dos asfaltos, foram estabelecidos ensaios não diretamente relacionados com propriedades fundamentais. Neste trabalho, dentre os ensaios de caracterização de ligantes asfálticos tradicionais foram utilizados:

Ponto de amolecimento (método do anel e bola)

O ponto de amolecimento de um material, no ensaio anel e bola, é o valor de temperatura na qual a consistência de um ligante asfáltico passa do estado

plástico ou semi-sólido para o estado líquido. É a temperatura lida no momento em que uma esfera metálica padronizada atravessa um anel, também padronizado, cheio de material asfáltico e toca uma placa de referência, após ter percorrido uma distância de 25,4 mm (ABNT/MB-164/NBR 6560, 1972). Quanto mais alta a temperatura do ponto de amolecimento, mais resistente à deformação permanente é a mistura.

Penetração

Este ensaio serve para determinar, de forma indireta, a viscosidade dos materiais asfálticos através da penetração, distância em décimos de milímetro que uma agulha padrão penetra verticalmente em uma amostra do material asfáltico sob condições específicas de temperatura (25°C), carga (100 g) e tempo (5 s) (ABNT/NBR 6576, 1998).

Ponto de fulgor

O ponto de fulgor de um ligante asfáltico é a temperatura na qual existe uma liberação de vapores do produto suficiente para, em mistura com ar e na presença de uma chama, provocar uma centelha. Portanto, indica a temperatura acima da qual o asfalto deve ser manuseado como produto inflamável, desde que haja uma fonte de ignição. Tem por objetivo garantir a segurança durante o transporte e manuseio, permitindo também a verificação de contaminações do asfalto por solventes, que têm ponto de fulgor mais baixo do que o dos asfaltos (ABNT/NBR 11341, 1990).

Ensaio Superpave

A nova especificação Superpave, desenvolvida a partir do Programa SHRP, classifica os ligantes asfálticos com base no desempenho e leva em consideração as condições climáticas, assim como o volume e as cargas do tráfego. Para determinar as propriedades fundamentais relacionadas aos principais defeitos que ocorrem nas misturas asfálticas, a especificação Superpave apresenta uma série de novos ensaios laboratoriais, em substituição aos ensaios tradicionais.

A premissa adotada no Programa SHRP foi de que os métodos empíricos não garantiam um bom desempenho a longo prazo e que precisavam ser revistos ou substituídos. Dessa forma, os ensaios Superpave, realizados a temperaturas similares às que ocorrem durante a vida em serviço dos pavimentos, procuram simular três estágios críticos da vida do ligante:

- comportamento durante o transporte, armazenagem e manuseio: simulado pelo

ensaio de viscosidade aparente utilizando um equipamento Brookfield;

- comportamento durante a produção e aplicação da mistura na pista: simulado pelo envelhecimento em ensaio de rotação de filme fino em estufa, RTFOT;
- comportamento após liberação ao tráfego: simulado pelo envelhecimento em vaso de pressão, PAV.

Os ensaios Superpave realizados neste trabalho para avaliar o ligante asfalto-borracha são descritos a seguir.

Viscosidade aparente (Brookfield)

O ensaio (ASTM D4402, 1995) para determinar a viscosidade aparente de ligantes asfálticos utiliza um viscosímetro rotacional (Brookfield), que mede a viscosidade através do torque necessário para rodar uma haste (*spindle*) imersa na amostra de asfalto quente, a velocidade constante. O viscosímetro rotacional, geralmente, caracteriza a rigidez do asfalto a 135°C, temperatura em que o material se comporta quase que inteiramente como um fluido viscoso. Para o ensaio de asfalto-borracha, têm-se utilizado, também, temperaturas mais elevadas (175°C, por exemplo, adotado pela ASTM D6114, 1997). A viscosidade do ligante é usada para garantir um asfalto fluido o suficiente para ser bombeado e misturado com o agregado.

Cisalhamento dinâmico

O ensaio de cisalhamento dinâmico, realizado com o equipamento Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR, *Dynamic Shear Rheometer*), é usado para caracterizar tanto o comportamento viscoso como o elástico, através da medida do módulo de cisalhamento complexo (G^*) e do ângulo de fase (δ) dos ligantes asfálticos. O G^* é a medida da resistência total do material à deformação quando exposto a pulsos repetidos de tensões de cisalhamento e consiste em um componente elástico (recuperável) e outro viscoso (não-recuperável). O δ é um indicador da quantidade relativa de deformação recuperável e não-recuperável (Harrigan *et al.*, 1994).

O DSR avalia a rigidez do ligante asfáltico (módulo complexo e ângulo de fase) sob condições de temperaturas máximas em serviço e a taxas de carregamento compatíveis com o tráfego. São ensaiadas amostras virgens ou envelhecidas em estufa de filme fino rotativo (RTFOT, envelhecimento de curto prazo), sendo estabelecidos valores mínimos capazes de garantir adequada resistência ao acúmulo de deformação permanente

($G^*/\text{sen}\delta$ maiores que 1,0 kPa e 2,2 kPa, respectivamente para amostras virgens e envelhecidas no RTFOT). O ensaio de cisalhamento dinâmico também é realizado com amostras envelhecidas em vaso de pressão (PAV, envelhecimento de longo prazo), a temperaturas médias do pavimento em serviço, sendo fixados valores máximos de rigidez para prevenir o aparecimento de trincas por fadiga ($G^*/\text{sen}\delta$ menores que 5000 kPa).

Rigidez à fluência na flexão

Para avaliar as propriedades dos ligantes a baixas temperaturas, é utilizado o reômetro de viga à flexão (BBR, *Bending Beam Rheometer*), que mede a deflexão no ponto médio de uma viga prismática de ligante betuminoso (virgem ou envelhecido), simplesmente apoiada, submetida a carregamento constante, também aplicado no meio do vão, por 240 s. A temperatura de ensaio é controlada e depende das temperaturas mínimas na região onde será construído o pavimento (Harrigan *et al.*, 1994). O desempenho de misturas asfálticas é previsto a partir da resposta tensão-deformação do ligante, uma vez que a resistência ao aparecimento de trincas por contração de origem térmica depende da rigidez à fluência. A especificação Superpave recomenda que o valor da rigidez no ensaio BBR seja menor que 300 MPa a 60 segundos. Segundo a especificação Superpave, o m , calculado para $t = 60$ s, deve ser maior ou igual a 0,300. Alguns ligantes, particularmente os modificados com polímeros, podem exibir uma rigidez estática a baixa temperatura maior do que o desejado. Entretanto, estes podem não trincar a baixas temperaturas devido à capacidade de deformar sem romper (Harrigan *et al.*, 1994).

Fatores ensaiados

Inicialmente, foram considerados seis fatores: tipo de borracha, tipo de CAP, tempo de mistura, tamanho das partículas de borracha, teor de borracha e temperatura de reação da mistura asfalto-borracha. Na elaboração da matriz fatorial, optou-se por fixar o tipo de borracha (Relastomer®), o tipo asfalto (CAP 20) e o tempo de mistura (30 minutos). Alguns dos ensaios realizados na Universidade da Flórida utilizaram CAP 30 e amostras produzidas com temperaturas de mistura de 150, 165 e 180°C, embora o fatorial principal considere apenas:

- teor de borracha: 5 níveis (0, 6, 12, 18 e 24%);
- tamanho das partículas de borracha: 2 níveis (#40 a #50 e #50 a #100);
- temperatura de mistura: 2 níveis (160 e 170°C).

Resultados e discussão

Os resultados apresentados neste trabalho consistem na primeira fase de análise em laboratório, em que as misturas asfalto-borracha foram submetidas aos ensaios empíricos utilizados para caracterização de materiais asfálticos (penetração, ponto de fulgor e ponto de amolecimento), assim como aos ensaios Superpave (propriedades reológicas e rigidez de ligantes) (Oda, 2000). Os valores apresentados nos gráficos são a média de três réplicas.

Ensaio Convencionais

Ponto de amolecimento das misturas asfalto-borracha

O ponto de amolecimento é crescente com o teor de borracha, indicando um aumento na resistência à deformação permanente das misturas contendo asfalto-borracha (Tabela 1).

Tabela 1. Média dos resultados dos ensaios de ponto de amolecimento, penetração e ponto de fulgor

Teor de Borracha (%)	Granulometria (mm)	Temperatura da mistura (°C)	Ponto de Amolecimento (°C)	Penetração (1/10mm)	Ponto de Fulgor (°C)
0	-	-	51,0	41,7	289
6	#50	160	54,0	40,3	265
6	#50	170	52,0	39,7	278
6	#40	160	55,0	36,7	283
6	#40	170	54,0	36,0	281
12	#50	160	58,0	59,7	317
12	#50	170	60,7	47,0	304
12	#40	160	58,7	51,3	291
12	#40	170	57,0	46,3	296
18	#50	160	62,7	43,0	294
18	#50	170	61,0	46,3	294
18	#40	160	64,0	40,0	308
18	#40	170	60,0	49,0	299
24	#50	160	65,0	48,0	293
24	#50	170	67,0	46,3	294
24	#40	160	65,5	47,0	298
24	#40	170	65,0	49,0	298

Penetração das misturas asfalto-borracha

O comportamento previsto é que a adição de borracha torna o ligante mais viscoso, resultando em valores mais baixos de penetração em função do aumento do teor de borracha nas misturas. Os resultados obtidos (Tabela 1), no entanto, mostram que a penetração aumenta até um teor de 12 %, estabilizando ou diminuindo para os teores de 18 e 24 % de borracha.

Ponto de fulgor das misturas asfalto-borracha

Quando da realização dos ensaios com o asfalto-borracha verificou-se que, após um determinado tempo de aquecimento da mistura, formava-se uma

película na superfície que bloqueava a liberação dos vapores e a mistura só se incendiava quando agitada com uma espátula. Mesmo com essa alteração no procedimento de ensaio, os resultados (Tabela 1) mostram que a adição de borracha, independentemente dos outros fatores, aumenta o ponto de fulgor (de 289°C, para o ligante sem borracha, até 317°C).

Ensaio Superpave

Viscosidade aparente das misturas asfalto-borracha

A viscosidade dos ligantes asfálticos é, geralmente, especificada a 60 e a 135°C. A viscosidade a 60°C é utilizada para classificar o asfalto, por ser próxima à máxima temperatura que o pavimento suportará quando em serviço. A viscosidade a 135°C serve para prover informação sobre a melhor temperatura de mistura em usina e de lançamento e compactação no campo. O ensaio de viscosidade do asfalto-borracha (ASTM D6114, 1997) também é realizado a 175°C, em função das temperaturas mais elevadas utilizadas para a produção desse material. Foram realizados ensaios de viscosidade de asfaltos-borracha produzidos com CAP20, às temperaturas de 135 e 175°C, e de asfaltos-borracha com CAP30, às temperaturas de 60 e 135°C. As Figuras 7, 8 e 9 mostram o efeito dos fatores (granulometria e teor de borracha, temperatura e tempo de mistura) na viscosidade do ligante asfalto-borracha. Para uma melhor comparação dos resultados obtidos com os dois cimentos asfálticos utilizados, a Figura 7 apresenta extrapolações para as temperaturas não ensaiadas, 60°C (para o CAP 20) e 175°C (para o CAP 30).

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que, dentre os fatores analisados, o teor de borracha é o que mais influencia a viscosidade do ligante asfalto-borracha, havendo um aumento da viscosidade com o aumento do teor de borracha (Figura 7). Comparando-se os resultados obtidos com CAP 20 e com CAP 30 percebe-se a maior susceptibilidade térmica do segundo, que apresenta valores de viscosidade apropriada para a mistura em usina e lançamento e compactação a temperaturas mais baixas do que as do CAP 20. Dessa forma, optou-se pelas temperaturas de mistura do asfalto-borracha de 160 e 170°C para a segunda etapa dos trabalhos, que será realizada apenas com CAP 20. Existe o efeito da temperatura de mistura, mas este não é significativo nem segue um padrão único para todos os teores de borracha (Figura 8). Quanto maior a granulometria da borracha maior é a viscosidade do asfalto-borracha (Figura 9), embora

continue sendo predominante o efeito do teor de borracha.

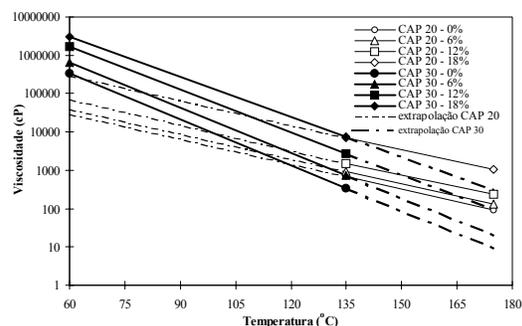


Figura 7. Variação da viscosidade em função do teor de borracha

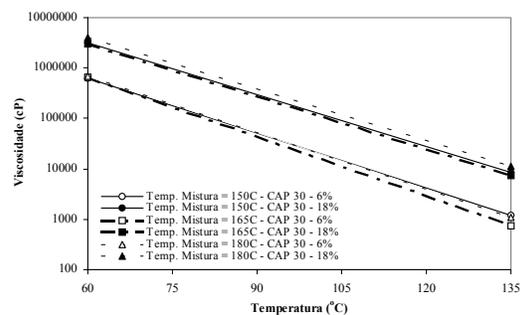


Figura 8. Efeito da temperatura da mistura na viscosidade do ligante asfalto-borracha

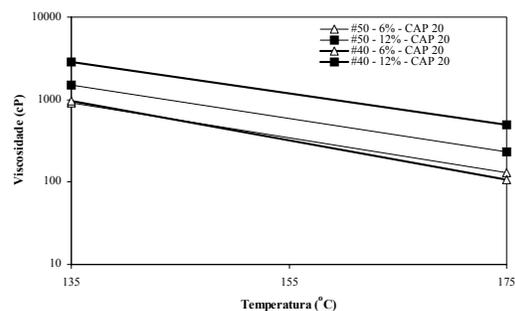


Figura 9. Efeito da granulometria da borracha na viscosidade do ligante asfalto-borracha

Propriedades reológicas das misturas asfalto-borracha

O módulo complexo (G^*) é a medida da resistência total do ligante asfáltico à deformação permanente. O ângulo de fase (δ , delta) indica a quantidade de deformação recuperável e não recuperável, apresentando valores menores quando o material é mais elástico, ou seja, mais resistente à

formação de trincas por fadiga. Nesse sentido, a Figura 10 apresenta os efeitos do teor de borracha nas propriedades reológicas diretamente relacionadas com as principais formas de deterioração estrutural de uma mistura asfáltica. Pode-se observar que as misturas com maior teor de borracha apresentam maiores valores de rigidez ($G^*/\text{sen}\delta$), ou seja, são mais resistentes ao acúmulo de deformação permanente. Também apresentam valores de ângulo de fase (δ) decrescente com o teor de borracha, o que significa um aumento da resistência à formação de trincas por fadiga no pavimento.

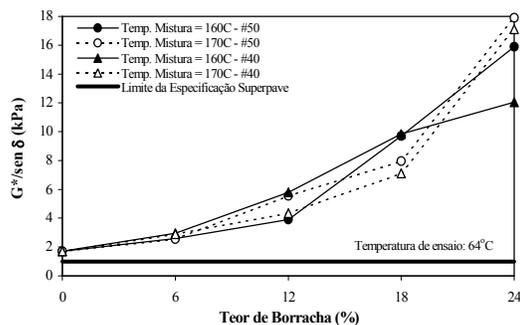


Figura 10. Efeito do teor de borracha na resistência ao acúmulo de deformação permanente

Rigidez das misturas asfalto-borracha à fluência na flexão

As amostras são ensaiadas com o reômetro de fluência na flexão (BBR) para avaliar a resistência à formação de trincas de origem térmica. Essa avaliação é feita a partir da rigidez (S) e do módulo de relaxação (m). Todas as amostras ensaiadas apresentaram valores de rigidez, no intervalo de 30,6 a 56,73 MPa, bem abaixo do limite máximo (300 MPa), e módulo de relaxação entre 0,444 a 0,521, acima do limite mínimo (0,300) estabelecido pela especificação Superpave (Harrigan *et al.*, 1994).

Apesar da necessidade de ensaios complementares, já previstos na programação fatorial elaborada, as evidências iniciais da pesquisa são de que a mistura asfalto-borracha pode ser benéfica aos pavimentos, melhorando as propriedades de resistência ao acúmulo de deformação permanente (maior rigidez a elevadas temperaturas) e de resistência à formação de trincas por fadiga (maior elasticidade). Além disso, as misturas asfalto-borracha ensaiadas também apresentaram suficiente resistência à formação de trincas por contração de origem térmica.

Os resultados do reômetro de cisalhamento dinâmico mostram que, com o aumento do teor de

borracha, há uma redução do ângulo de fase, δ (maior elasticidade e, portanto, maior resistência à formação de trincas por fadiga no pavimento) e um aumento do módulo de cisalhamento complexo, G^* (maior resistência à deformação permanente). Isso também pode ser verificado a partir dos resultados do ensaio de ponto de amolecimento, uma vez que o mesmo é crescente com o teor de borracha, indicando um aumento na resistência à deformação permanente das misturas contendo asfalto-borracha.

Quanto aos fatores considerados na elaboração das misturas asfalto-borracha, pode-se concluir, principalmente a partir dos resultados apresentados pelo ensaio de viscosidade Brookfield, que a temperatura e o tempo de mistura utilizados na preparação do ligante asfalto-borracha exercem pouca influência na viscosidade. O efeito preponderante é do teor de borracha, que deve ser o fator mais investigado na continuidade da pesquisa.

Na etapa seguinte do trabalho, serão desenvolvidos modelos estatísticos visando identificar efeitos das interações significativas entre os fatores. Procura-se, dessa forma, estabelecer quais combinações de tamanho das partículas da borracha e temperatura de mistura, para diferentes teores de borracha, podem conduzir aos mesmos resultados. Economicamente, isto é importante porque o tamanho das partículas e a temperatura de mistura estão diretamente relacionados à quantidade de energia necessária para a produção de asfalto-borracha.

Finalmente, espera-se que os resultados deste trabalho possam acelerar a implementação de projetos de asfalto-borracha e, conseqüentemente, ajudar a solucionar os graves problemas causados pela disposição inadequada de pneus usados.

Referências

- ABNT/MB-164/NBR 6560. *Determinação do ponto de amolecimento de materiais betuminosos - método do anel e bola*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1972.
- ABNT/NBR 11341. *Produtos de petróleo - determinação do ponto de fulgor e de combustão em vaso aberto de Cleveland*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990.
- ABNT/NBR 6576. *Materiais betuminosos - determinação da penetração*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998.
- ARPG. *Uses of asphalt rubber*. Asphalt Rubber Producers Group, Phoenix: Arizona, 1993.
- ARTS - *Asphalt rubber technology service*. Disponível em <http://www.ces.clemson.edu/arts/index.html>. Acesso em: 16 jun. 2001.

- ASPHALT INSTITUTE. Performance graded asphalt binder specification and testing - SP-1, Lexington, KY, 1995.
- ASTM D4402. Standard test method for viscosity determinations of unfilled asphalts using brookfield thermosel apparatus. Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 1995.
- ASTM D6114. Standard specifications for asphalt-rubber binder. American Society for Testing and Materials, 1997.
- BAHIA, H.U. *et al.* Classification of asphalt binders into simple and complex binders. *Proc. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, Saint Paul, v. 67, p.01-41, 1998.
- CEMPRE. *Pneus*. Ficha Técnica 8. Compromisso Empresarial para Reciclagem. 1998 Disponível em <http://www.cempre.org/ficha8.htm>. Acesso em 15 abr. 1998.
- EPPS, J.A. Uses of recycled rubber tires in highways. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice, *Transportation Research Board*, Washington, DC, n. 198, p. 1-162, 1994.
- ESTAKHRI, C.K. *et al.* Use, Availability, and cost-effectiveness of asphalt rubber in Texas. *Transp. Res. Rec.*, TRB, Washington, DC, n.1339, p.30-37, 1992.
- GEIPOT - Ministério dos Transportes e Empresa Brasileira de Planejamento em Transportes. *Anuário Estatístico de Transportes*, 2000. Disponível em <<http://www.geipot.gov.br>> Acesso em 20 out. 2000.
- GOODYEAR. *Charles Goodyear and the Strange Story of Rubber*. 1999. Disponível em <http://www.goodyear.com/corporate_information>. Acesso em 15 fev. 1999.
- HARRIGAN, E.T. *et al.* *The SUPERPAVE Mix design system manual of specifications, test methods, and practices*. SHRP-A-379. Strategic Highway Research Program. Washington, DC: National Research Council, 1994.
- HEITZMAN, M. Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier. *Transp. Res. Rec.*, TRB, Washington, DC, n.1339, p.01-08, 1992.
- HICKS, R.G. *et al.* Crumb Rubber Modifier (CRM) in Asphalt Pavement: Summary of Practices in Arizona, California, and Florida. FHWA-SA-95-056. September, 1995.
- LEITE, L.F.M. *Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero*. 1999. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.
- McQUILLEN, JR., J.L. *et al.* Economic analysis of rubber-modified asphalt mixes. *J. Transp. Eng.*, Reston, v.114, n.3, p.259-277, 1988.
- ODA, S. *Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação*. 2000. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- PAGE, G.C. *et al.* Florida's approach using ground tire rubber in asphalt concrete mixtures. *Transp. Res. Rec.*, Washington, D.C., n.1339 p.16-22, 1992.
- PATERSON, W.D.O. *Engineering and economic efficiency for highways: an introduction to the highway design and maintenance standards model*. Washington DC: HDM. World Bank. Infrastructure Operations. 1991.
- ROMINE, R.A. *et al.* Survey of state highway authorities and asphalt modifier manufacturers on performance of asphalt modifiers. *Transp. Res. Rec.*, Washington, D.C., n.1323, p.61-69, 1991.
- RUTH B.E. *et al.* *Recycling of asphalt mixtures containing crumb rubber*. Final Report. FL/DOT/MO D510717. Florida: University of Florida. Florida Department of Transportation, 1997.
- SALTER, R.J.; MAT, J. Some effects of rubber additives on asphalt mixes. *Transp. Res. Rec.*, Washington, D.C., n.1269, p.79-86, 1990.
- SOUSA, J.B. *et al.* Application of SHRP mix based specifications. *Transp. Res. Rec.*, Washington, D.C., n.1454, p.154-162, 1994.
- STEPHENS, J.E. Field evaluation of rubber-modified bituminous concrete. *Transp. Res. Rec.*, Washington, D.C., n.843, p.11-21, 1982.
- TAKALLOU, H.B.; HICKS, R.G. Development of improved mix and construction guidelines for rubber-modified asphalt pavements. *Transp. Res. Rec.*, Washington, D.C., n.1171, p.113-120, 1988.
- TAKALLOU, H.B.; SAINTON, A. Advances in technology of asphalt paving materials containing used tire rubber. *Transp. Res. Rec.*, Washington, D.C., n.1339, p.23-29, 1992.
- TUNES, S. Um fim para os restos da indústria. *Revista Globo Ciência*. São Paulo: Ed. Globo, ano 8, n.85, Agosto, p.26-31, 1998.

Received on January 26, 2001.

Accepted on March 28, 2001.