

## IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço

Fortaleza/CE - BRASIL - 07 a 09 de outubro 2009

### REDUÇÃO DA ESPESSURA DOS PAVIMENTOS UTILIZANDO MISTURAS COM ASFALTO-BORRACHA

*Liseane Fontes<sup>1</sup>; Glicério Trichês<sup>2</sup>; Paulo Pereira<sup>3</sup> & Jorge Pais<sup>4</sup>*

#### RESUMO

A observação do desempenho de pavimentos em serviço tem demonstrado que a utilização de misturas asfálticas com asfalto-borracha em camadas de revestimentos apresentam um comportamento estrutural superior quanto à fadiga e à deformação permanente comparativamente às misturas convencionais. Considerando a crescente aplicação deste tipo de misturas asfálticas no Brasil, neste trabalho foram realizados, em laboratório, os seguintes ensaios mecânicos de desempenho: (i) módulo dinâmico; (ii) fadiga (flexão alternada em quatro pontos), nos quais foram avaliadas misturas com asfalto-borracha do tipo *terminal blend*, de procedência brasileira. Dois tipos de asfalto-borracha *terminal blend* foram avaliados (com 15% e 20% de borracha), com dois tipos de granulometrias (*dense graded* e *gap graded*). O desempenho das misturas com asfalto-borracha *terminal blend* foi comparado com a mistura convencional Concreto Asfáltico Usinado à Quente Faixa "C" (CAUQ), considerada como a mistura referência e produzida com o asfalto CAP 50/70. Os resultados obtidos foram utilizados no dimensionamento de um pavimento, através da análise empírico-mecanicista, no qual foi obtida a redução da espessura da camada de revestimento quando se utiliza uma mistura com asfalto-borracha. Os resultados dos ensaios de laboratório mostraram que as misturas com asfalto-borracha apresentaram um desempenho mecânico superior à mistura convencional. Considerando o uso de misturas com asfalto-borracha na camada de revestimento, em substituição à mistura convencional, foi possível obter-se uma considerável redução da espessura desta camada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Asfalto-borracha; Fadiga; Dimensionamento.

#### ABSTRACT

The performance of in service pavements has indicated that the use of asphalt rubber mixtures in surface layers improves the fatigue and permanent deformation when compared to conventional mixtures. Considering the growing application of this type of asphalt mixtures in Brazil, this work carried out a laboratory evaluation of Brazilian terminal blend asphalt rubber mixtures for design purposes. Dynamic modulus and fatigue resistance (alternate flexural bending in four point bending test) were evaluated for asphalt rubber mixtures. Two types of terminal blend asphalt rubber were considered (with 15% and 20% of rubber), using two gradation types (*dense graded* and *gap graded*). The performance of the terminal blend asphalt rubber mixtures was compared to the most used conventional mixture in Brazil, considered as the reference mixture, produced with 50/70 pen asphalt. The results obtained were used in pavement design, through

<sup>1</sup> Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil – PPGEC, Rua: João Pio Duarte Silva, s/n Caixa Postal 476 Córrego Grande, Florianópolis – SC, 88015-230, Brasil, lisefontes@matrix.com.br

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Civil – PPGEC, Rua: João Pio Duarte Silva, s/n, Caixa Postal 476 Córrego Grande, Florianópolis – SC, 88015-230, Brasil, ecv1gtri@ecv.ufsc.br

<sup>3</sup> Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal, ppereira@civil.uminho.pt

<sup>4</sup> Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal, jpais@civil.uminho.pt

the empirical-mechanistic analysis, in which a reduction in the thickness of the surface layer was accomplished with the use of an asphalt rubber mixture.

**KEY WORDS:** Asphalt rubber; Fatigue; Design.

## 1. INTRODUÇÃO

As patologias que ocorrem com maior frequência na malha rodoviária brasileira são o trincamento por fadiga e por propagação e as deformações permanentes. Uma das alternativas mais utilizadas no Brasil para reabilitação dos revestimentos deteriorados é a colocação de misturas convencionais sobre o revestimento a ser reabilitado, que pode ser realizada com ou sem fresagem da camada antiga. No entanto, pouco tempo após a reabilitação têm-se verificado a degradação prematura dos revestimentos. Assim, o desenvolvimento de pesquisas de novas misturas e de métodos eficientes de dimensionamento torna-se absolutamente necessária face à realidade do Brasil.

A adição de borracha de pneus usados ao asfalto, denominado asfalto-borracha, incorporado à produção de misturas asfálticas tem mostrado que estas apresentam um bom desempenho mecânico devido à maior resistência à fadiga, elevada resistência à deformação permanente e boa capacidade de retardar a propagação de fendas em comparação às misturas convencionais.

Neste contexto, este trabalho trata da avaliação de misturas asfálticas com asfalto-borracha produzido através do sistema *terminal blend*. O asfalto base utilizado na produção dos asfaltos-borracha foi o CAP 50/70. Para tanto, foram utilizadas granulometrias do tipo *dense graded e gap graded*. O desempenho obtido por estas misturas foi comparado à uma mistura convencional do tipo *dense graded* (DNIT Faixa “C”), confeccionada com CAP 50/70, comumente utilizada em camadas de revestimento de pavimentos flexíveis em Santa Catarina.

O desempenho mecânico das misturas asfálticas produzidas foi avaliado através de ensaios de módulo dinâmico e de fadiga. Adicionalmente, foi realizado o dimensionamento de uma estrutura de pavimento, aplicando-se, para cada mistura estudada, as leis de fadiga obtidas no ensaio de fadiga, e contemplando a redução da espessura da camada asfáltica.

Os materiais (asfaltos e borracha) utilizados no estudo são de procedência brasileira e os agregados, de origem portuguesa. Os ensaios de desempenho foram realizados na Universidade do Minho, em Portugal.

## 2. MISTURAS ASFÁLTICAS COM ASFALTO-BORRACHA

A quantidade de resíduos provenientes da indústria da borracha e do destino final dos pneus do tráfego rodoviário impulsionou o desenvolvimento de estudos relacionados à reutilização deste material, sendo que a incorporação aos asfaltos, como agente modificador, tem sido estudado há vários anos e constitui uma alternativa à reciclagem destes materiais. A aplicação de misturas com asfalto-borracha tem sido realizada, em geral, com sucesso em diversos países com diferentes condições de tráfego e climáticas.

A obtenção de borracha de pneus usados pode ser realizada através da trituração à temperatura ambiente ou com temperaturas criogênicas (inferiores a -120 °C). A norma ASTM D 6114 (1997) fornece as especificações para a borracha granulada empregada no asfalto-borracha.

A adição da borracha ao asfalto resulta em um material com propriedades e características diferentes do asfalto que lhe deu origem. Esta interação é influenciada por diversas variáveis, como

pela temperatura, pelo tempo de digestão, quantidade e tipo de borracha empregues na mistura (Baker *et al.*, 2003).

O asfalto-borracha é introduzido em uma mistura asfáltica através de dois processos, o úmido e o seco. No processo seco, a borracha desempenha a função de agregado e é adicionada antes da incorporação do ligante aos agregados. De acordo com a norma ASTM D 8 (1997), o asfalto-borracha no processo úmido é uma mistura de asfalto, borracha e de determinados aditivos na qual a borracha representa pelo menos 15% da massa total da mistura que reagiu com o asfalto a uma temperatura suficientemente elevada para causar o inchamento das partículas de borracha.

A compatibilidade do sistema (asfalto-borracha) constitui um arranjo estrutural das partículas de borracha formando cadeias dentro da matriz que é o asfalto. No entanto, para que ocorra uma mudança das características do asfalto, como aumento de elasticidade, aumento da coesão e outras propriedades desejáveis, a borracha necessita ser totalmente ou parcialmente digerida, sendo esta a base do processo (Holleran, 2000).

O processo úmido engloba ainda dois sistemas de produção que são o *continuous blend* e *terminal blend*. A reação é realizada em caminhões separados ou em tanques, no sistema *continuous blend*, ou em unidades industriais (sistema *terminal blend*). O asfalto-borracha produzido através do sistema *terminal blend*, da mesma forma que no sistema *continuous blend*, consiste na incorporação da borracha granulada em equipamento apropriado. No entanto, a modificação física, reológica e química do asfalto convencional é realizada em unidade industrial, através de um adequado processo de fusão por meio de agitação mecânica e digestão térmica devidamente controlada que resulta em um produto uniforme e estável (Morilha & Greca, 2003).

As misturas com asfalto-borracha, são, em geral, aplicadas em diferentes granulometrias, *dense graded*, *open graded* e *gap graded*. As diferenças entre a composição das misturas são baseadas no tamanho dos agregados, percentagem de asfalto e volume de vazios (Roberts *et al.*, 1989; Caltrans, 2003<sub>B</sub>).

As misturas *dense graded* possuem um baixo volume de vazios, uma considerável resistência à abrasão provocada pelo tráfego e fornecem impermeabilidade à camada e têm sido as mais utilizadas em reabilitação de pavimentos como camada de revestimento (Caltrans, 2003<sub>B</sub>). No tipo *gap graded*, a curva granulométrica não apresenta uma granulometria contínua para todos os tamanhos de agregados, normalmente faltando uma ou duas frações de agregados finos, sendo usada para promover o contato grão-a-grão na mistura asfáltica (Hicks, 2002; Caltrans, 2003<sub>A</sub>).

Diversos autores, como exemplo, Sousa *et al.* (1999) Shatnawi & Long (2000), Antunes *et al.* (2000), Shatnawi & Holleran (2003) e Dantas Neto (2004) mostraram, através de ensaios laboratoriais, que as misturas asfálticas produzidas com asfalto-borracha apresentam uma resistência à fadiga significativamente superior às misturas asfálticas convencionais.

### **3. PARÂMETROS DE DESEMPENHO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS**

#### **Módulo dinâmico**

Nas metodologias mecanicistas de dimensionamento de um pavimento flexível as misturas asfálticas são caracterizadas através do seu módulo de rigidez e coeficiente de Poisson. A rigidez de uma mistura asfáltica depende da temperatura e do tempo de carregamento, estando este relacionado com a velocidade de circulação dos veículos pesados. A rigidez é mais elevada na presença de baixas temperaturas e curtos tempos de carregamento, quando o comportamento da

mistura é essencialmente elástico, sendo esta rigidez utilizada no dimensionamento. Por outro lado, a rigidez é reduzida para altas temperaturas e longos tempos de carregamento, quando o comportamento da mistura é essencialmente viscoso, sendo esta rigidez fundamental para a previsão de deformações permanentes (Silva, 2006).

As misturas asfálticas apresentam um comportamento viscoelástico, que é avaliado em ensaios cíclicos com um carregamento sinusoidal. O módulo complexo  $E^*$  é o número complexo definido como a razão entre a amplitude complexa de uma tensão sinusoidal a uma pulsação ou velocidade angular ( $\omega = 2\pi Fr$ ) aplicada a um material e a amplitude complexa de uma extensão sinusoidal. Considerando o carácter viscoelástico do material, a extensão possui um atraso em relação à tensão, que é representado pelo ângulo de fase ou de defasagem ( $\phi$ ). A norma do módulo complexo é definida como módulo dinâmico.

## Fadiga

Os pavimentos estão submetidos a um estado de tensão repetida, provocado pela aplicação das cargas dos veículos, que se caracteriza pela fadiga das misturas asfálticas. A avaliação da resistência à fadiga de uma mistura asfáltica, necessária ao dimensionamento de pavimentos, deve ser realizada utilizando ensaios mecânicos, que devem reproduzir, o melhor possível, as condições a que a mistura está submetida *in situ* (Silva, 2006).

Os ensaios de flexão simples representam as condições que as misturas asfálticas estão submetidas *in situ*. Os ensaios podem ser realizados em extensão ou tensão controlada. No ensaio à tensão controlada, o critério de fadiga está associado a ruptura do corpo-de-prova, sendo que a tensão é mantida constante ao longo do ensaio e as deformações atingem um valor máximo até o estágio de colapso. Assim, a vida de fadiga ( $N$ ) é definida como o número total de aplicações de uma carga necessária à ruptura completa do corpo-de-prova. No ensaio à extensão controlada, o critério de fadiga não está condicionado à ruptura completa do corpo-de-prova. De modo que a deformação seja mantida constante ao longo do ensaio, é necessário que haja uma diminuição do carregamento aplicado (Preussler & Pinto, 2001).

Os resultados destes ensaios são expressos em termos de leis de fadiga, como o proposto por Monismith *et al.* (1971):

$$N = a \times \left( \frac{1}{\varepsilon \text{ ou } \sigma} \right)^b \quad (1)$$

onde:  $N$  = vida de fadiga expressa em número de solicitações de carga;  $\varepsilon$  ou  $\sigma$  = extensão ou tensão de tração controlada, respectivamente;  $a$ ,  $b$  = constantes determinadas experimentalmente.

## 4. MATERIAIS UTILIZADOS

### Agregados

Os agregados pétreos, graníticos britados, utilizados neste trabalho foram provenientes de uma pedra localizada no norte de Portugal. Um filer calcário calcítico foi adicionado à mistura para satisfazer às exigências granulométricas. Os agregados minerais utilizados na produção das misturas asfálticas possuem a seguinte designação granulométrica: (i) brita 6/12 – tamanho nominal 6,0 a 12,0 mm; (ii) brita 4/10 – tamanho nominal 4,0 a 10,0 mm; (iii) brita 0/4 (pó de pedra) – tamanho

nominal inferior a 4,0 mm. A Figura 1 apresenta a análise granulométrica dos agregados. Os resultados ensaios físicos e mecânicos dos agregados mostraram que os mesmos satisfazem às especificações, sendo adequados para a produção de misturas asfálticas.

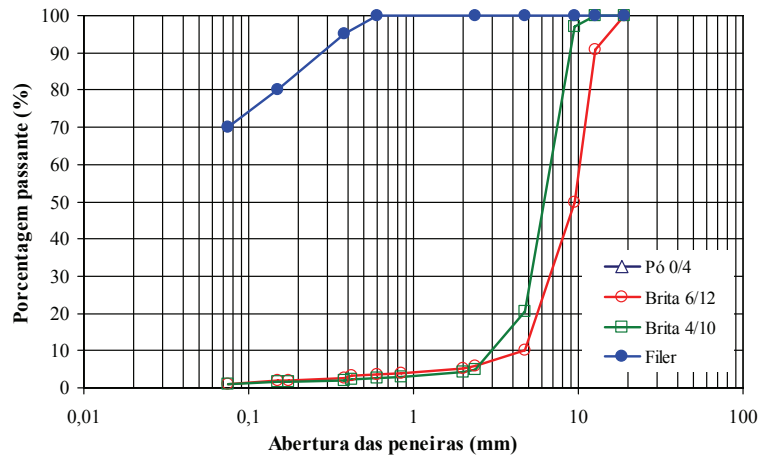


Figura 1. Granulometria dos agregados

### Asfalto convencional e asfalto-borracha *terminal blend*

O asfalto convencional utilizado como asfalto base na produção dos asfaltos-borracha e também na confecção da mistura convencional foi o CAP 50/70, de origem brasileira. O CAP 50/70 é especificado de acordo com a norma DNIT – EM 095 (2006). O Quadro 1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização do CAP 50/70 (AC).

O asfalto-borracha utilizado é proveniente do sistema *terminal blend*, de procedência brasileira. A borracha foi produzida no processo ambiente, no qual o corte e moagem dos pneus usados são realizados em temperatura ambiente. Foram utilizados dois tipos de asfalto-borracha *terminal blend*, com porcentagens de borracha incorporada de 15% (AB15) e de 20% (AB20). O Quadro 2 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização.

Quadro 1. Caracterização do CAP 50/70 (AC)

Ensaio	Norma	Especificação	AC
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)	ASTM D 5	50 – 70	51,5
Ponto de amolecimento <sup>(i)</sup> (°C)	ASTM D 36	46 mín.	51,5
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 135 °C	ASTM D 2196	mín. 274	580
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 150 °C	ASTM D 2196	mín. 112	150
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 177 °C	ASTM D 2196	57 – 285	112
Resiliência (%)	ASTM D 5329	–	0

(i) Método anel e bola; (ii) Viscosímetro Brookfield, *spindle* 21, 20 rpm.

Quadro 2. Caracterização dos asfaltos-borracha

Ensaio	Norma	Especificação <sup>(i)</sup>	AB15	AB20
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)	ASTM D 5	25 a 75	42,0	40,0
Ponto de amolecimento <sup>(ii)</sup> (°C)	ASTM D 36	54,4 mín.	67,7	68,0
Viscosidade aparente <sup>(iii)</sup> (cP) a 175 °C	ASTM D 2196	1500 mín.	1644	2179
Resiliência (%)	ASTM D 5329	20	33	28

(i) ASTM D 6114 (1997), tipo II; (ii) Método anel e bola; (iii) Viscosímetro Brookfield, *spindle* 27, 20 rpm.

De acordo com o Quadro 2, os dois asfaltos-borracha, AB15 e AB20, atendem às especificações constantes na ASTM D 6114 (1997). O asfalto AB20 apresentou um valor de penetração inferior ao asfalto AB15, o que é explicado por conter uma maior quantidade de borracha incorporada. Pela

mesma razão, o asfalto AB20 possui uma viscosidade mais elevada do que o BB15, que pode refletir em uma menor trabalhabilidade quando da produção de misturas asfálticas.

Quanto ao ponto de amolecimento, o resultado de ambos foi praticamente igual. Comparativamente ao asfalto convencional AC (CAP 50/70) que apresentou um ponto de amolecimento de 51,5 °C (Quadro 2) constatou-se a melhoria desta propriedade, em mais de 15 °C, quando se adiciona a borracha ao asfalto. O mesmo comportamento foi observado no parâmetro resiliência, que fornece um indicativo da recuperação elástica do material. Enquanto que o asfalto convencional não mostrou recuperação elástica, a incorporação da borracha de pneus alterou este comportamento.

## 5. CORPOS-DE-PROVA PARA ENSAIOS DE DESEMPENHO

### Formulação das misturas asfálticas

As misturas com asfalto-borracha *terminal blend* foram produzidas com a granulometria *gap graded*, especificada pelo Caltrans, tipo ARHM GG Mix (*Asphalt Rubber Hot Mix Gap Graded*), e *dense graded*, especificada pelo *Asphalt Institute* (AI), tipo IV. A mistura convencional, produzida com o asfalto CAP 50/70, é especificada de acordo com o DNIT – ES 031 (2006). A Figura 2 mostra as curvas granulométricas das misturas. A formulação das misturas asfálticas foi realizada de acordo com a metodologia Marshall, como apresentado no Quadro 3.

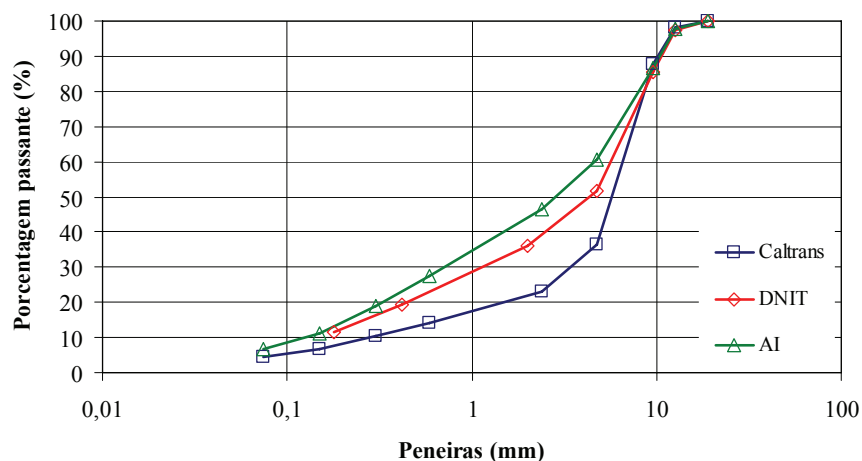


Figura 2. Granulometria das misturas

Quadro 3. Resultados da formulação

Mistura	Granulometria	Tipo de asfalto	Porcentagem de asfalto (%)	Volume de vazios (%)	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )
CAB20	Caltrans	AB20	8,5	6,0	2,32
IAB15	<i>Asphalt Institute</i>	AB15	7,0	5,0	2,35
DAC	DNIT	AC	5,5	4,0	2,37

As misturas com asfalto-borracha necessitam de uma porcentagem mais elevada de asfalto, o que poderia favorecer o aparecimento de deformação permanente. Embora não apresentado neste trabalho, é importante acrescentar que estas misturas foram ensaiadas à deformação permanente e atenderam às especificações constantes na norma espanhola NLT 173 1984) para clima quente e tráfego pesado. Após a formulação das misturas foram moldadas, para cada mistura, uma laje (placa com dimensões 75 cm de comprimento, 49 cm de largura e 8 cm de espessura) para a obtenção dos corpos-de-prova para os ensaios de desempenho. A compactação das misturas seguiu o preconizado pela norma AASHTO PP3 (1994) e foi realizada com um rolo liso de médio porte (massa total de 861 kg). Após a desmoldagem das lajes foram serrados 9 corpos-de-prova prismáticos (381x 50,8 x

63 mm) para os ensaios de módulo dinâmico e de fadiga. Após secagem em ambiente climatizado ( $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ ) foi feita a seleção dos corpos-de-prova, através da medição das dimensões e da densidade aparente.

## 6. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESEMPENHO

### Módulo dinâmico e fadiga

Para a realização de ensaios de módulo e de fadiga foi utilizado um equipamento servo-hidráulico (Figura 3a) constituído por uma estrutura de carga, um grupo hidráulico e uma câmara climática para controle da temperatura durante todo o ensaio, dentro da qual se encontra um dispositivo que permite a realização de ensaios de flexão em 4 pontos (Figura 3b).

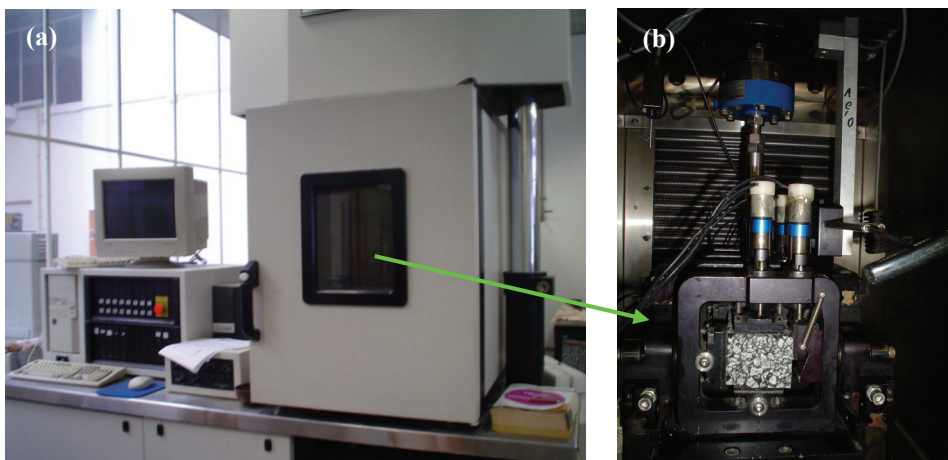


Figura 3. Equipamento e dispositivo para realização de ensaios em flexão alternada

A determinação do módulo dinâmico foi realizada aplicando-se um carregamento sinusoidal alternado, correspondente a uma extensão máxima de tração na base do corpo-de-prova de  $50 \times 10^{-6}$ . Os ensaios foram conduzidos na temperatura de  $20\text{ °C}$  em sete frequências, sendo, 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2 e 0,1 Hz, de acordo com o preconizado na norma ASTM 3497 (1995).

Os ensaios de fadiga foram realizados, em extensão controlada, de acordo com a norma AASHTO TP8 (1994) (*Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending*). Neste ensaio, uma carga é aplicada nos terços médios do provete, de modo a induzir uma extensão de tração predefinida. Para a avaliação da vida de fadiga, foram realizadas 3 repetições para cada um dos níveis de extensões selecionados (200, 400 e  $800\text{ }\mu\text{m/m}$ ), à temperatura de  $20\text{ °C}$  e frequência de 10 Hz. O critério de ruptura adotado foi definido como correspondente ao decréscimo de 50% da rigidez do corpo-de-prova do seu valor inicial. O Quadro 4 apresenta os resultados dos ensaios de módulo dinâmico das misturas e a Figura 4 as respectivas curvas de fadiga obtidas.

Quadro 4. Módulos dinâmicos

Mistura	Granulometria	Tipo de asfalto	Percentagem de asfalto (%)	Módulo dinâmico (MPa)
CAB20	Caltrans	AB20	8,5	4864
IAB15	<i>Asphalt Institute</i>	AB15	7,0	4909
DAC	DNIT	AC	5,5	6314

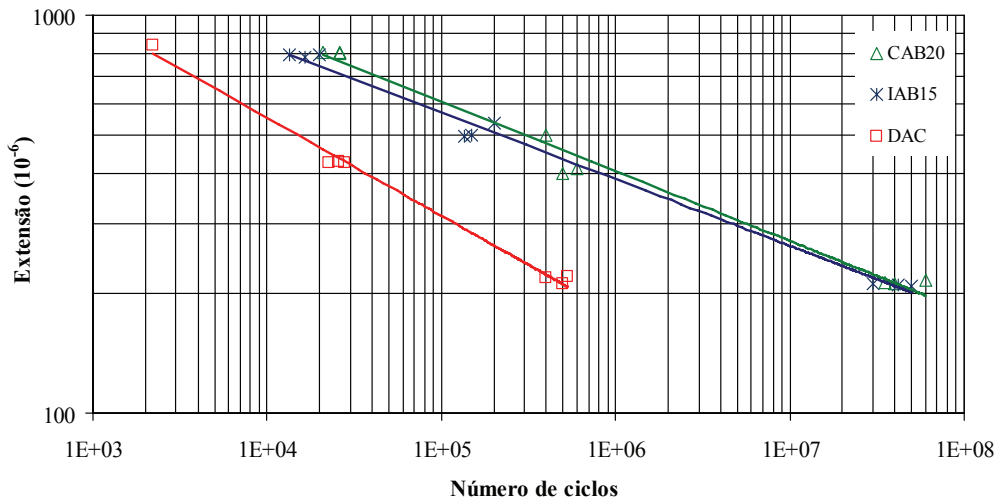


Figura 4. Curvas de fadiga

Relativamente ao módulo de dinâmico, verificou-se, nas misturas com asfalto-borracha, apresentam um valor inferior à mistura convencional. Quanto a resistência à fadiga, as misturas com asfalto-borracha apresentaram um desempenho muito superior à mistura convencional.

## 7. DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento de um pavimento tem como objetivo definir as espessuras das camadas da estrutura, de forma que a vida útil do mesmo corresponda a um certo número solicitações de carga estimado no período de projeto. Na análise mecanicista de dimensionamento, os principais parâmetros avaliados são os seguintes (i) extensão de tração ( $\epsilon_t$ ) na fibra inferior da camada asfáltica, para controle do trincamento por fadiga; (ii) o estado de tensão no topo da camada de base, importante em estruturas com revestimento delgados para se controlar a ruptura por cisalhamento; (iii) a tensão ( $\sigma_t$ ) ou deformação vertical ( $\epsilon_v$ ) no topo do subleito para controle da deformação permanente.

Neste trabalho, foi realizado o dimensionamento de uma estrutura de pavimento flexível um tráfego pesado, N igual a  $10^8$  solicitações (calculados de acordo com a metodologia do *United States Army Corps of Engineers* – USACE) do eixo padrão (80 kN), de modo a avaliar o impacto da adoção de camadas de revestimento confeccionadas com asfalto-borracha em substituição às misturas convencionais.

A estrutura do pavimento foi dimensionada pelo método empírico do DNIT (DNIT, 2006) com o objetivo de fornecer uma estrutura inicial (Quadro 5). Posteriormente foi realizada a análise mecanicista da estrutura através do programa BISAR 3.0, cuja geometria utilizada no carregamento foi eixo simples de roda dupla de 80 kN, carga em cada pneu de 20 kN e espaçamento entre rodas de 0,1575 m.

Na análise foi adotada a estrutura mostrada no Quadro 5, sendo que foram variados, a cada simulação, os módulos (Quadro 4) e as espessuras das camadas asfálticas, sendo mantidas as características das camadas inferiores.

A Figura 5 apresenta os resultados da simulação com o programa BISAR 3.0, sendo o valor de N (vida de fadiga obtida através das leis de fadiga dos ensaios) em função da extensão de tração na fibra inferior da camada asfáltica, para cada mistura e para cada espessura atribuída à camada.



Quadro 5. Estrutura dimensionada através do DNIT e estrutura a ser simulada

Camada	Espessura (cm) DNIT	Espessura (cm) Simulação	Módulo (MPa)	Coef. de Poisson
Revestimento	12,5	6 a 18 <sup>(iii)</sup>	Variável <sup>(iv)</sup>	0,35
Base <sup>(i)</sup>	15,0	15	400	0,40
Camada granular	20,0	20	200	0,40
Subleito	<sup>(ii)</sup>	$\infty$	100	0,45

(i) Base em brita graduada; (ii) Índice de Suporte Califórnia = 10%; (iii) Para a mistura DAC a espessura de revestimento foi calculada até 26 cm; (iv) De acordo com o Quadro 4.

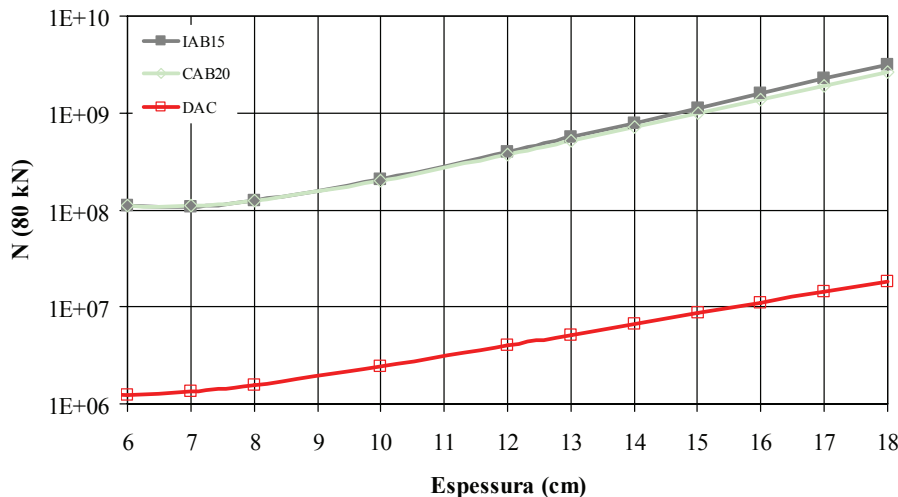


Figura 5. N em função da espessura da camada asfáltica, para cada tipo de mistura

A partir das leis de fadiga obtidas, e considerando-se o fator laboratório-campo igual a 1, a análise mecanista conduzida mostrou que, uma camada de revestimento de 6 cm de espessura confeccionada com asfalto-borracha seria suficiente para suportar um N de  $10^8$ . Entretanto, a experiência da prática de dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil levanta a dúvida de que esta espessura seria insuficiente para atender a um tráfego de  $10^8$ , mesmo com uma mistura com elevada resistência à fadiga como apresentada pelas misturas com asfalto-borracha.

Assim, buscou-se estabelecer para estas duas misturas a equivalência estrutural das misturas com asfalto-borracha em relação à mistura convencional, tomando como referência o estudo de redução de espessura estabelecido pelo Caltrans (1992).

## 8. CONSIDERAÇÃO DA REDUÇÃO DA ESPESSURA DE REVESTIMENTO

Na adaptação do guia de redução de espessura recomendado pelo Caltrans (1992), considerou-se que a primeira camada a que se refere o procedimento, a qual seria em mistura convencional, será substituída por uma camada de asfalto-borracha com a mesma espessura recomendada. Neste estudo, a adaptação foi realizada para as misturas com asfalto-borracha tendo em conta os resultados obtidos nos ensaios de desempenho. O Quadro 6 apresenta os valores recomendados pelo Caltrans (1992) e a proposição apresentada.

Desta forma, de acordo com a proposição apresentada, a consideração da redução da espessura da camada de revestimento seria utilizada do seguinte modo:

- determinação da espessura da camada de revestimento em mistura convencional através da análise mecanista;
- determinação da espessura equivalente da mistura com asfalto-borracha conforme Quadro 6.

Com a incorporação das curvas de fadiga obtidas no dimensionamento realizado, a espessura da camada de revestimento requerida para uma mistura convencional seria de 26 cm. De acordo com o Quadro 6, as espessuras da camada de revestimento confeccionada em mistura com asfalto-borracha (CAB20 e IAB15), para  $N = 10^8$ , seria de 16 cm.

Quadro 6. Valores de espessuras recomendados pelo Caltrans (1992) e a proposição apresentada, considerando a redução da espessura das camadas de revestimento em asfalto-borracha

Espessura calculada para a mistura convencional (cm)	Espessuras recomendadas pelo Caltrans (1992)		Espessuras propostas em misturas com asfalto-borracha (cm)
	Mistura convencional (cm)	Mistura com asfalto-borracha (cm)	
4,0	-	3,0 <sup>(i)</sup>	4,5 <sup>(ii)</sup>
5,0	-	3,0 <sup>(i)</sup>	4,5 <sup>(ii)</sup>
6,0	-	3,0	4,5 <sup>(ii)</sup>
7,6	-	4,5	4,5
8,0	-	4,5	4,5
9,0	-	4,5	4,5
10,5	-	6,0	5,0
12,0	-	6,0	6,0
13,0	-	6,0	6,5
14,0	4,5	4,5	9,0
15,0	6,0	4,5	10,5
16,0	6,0	4,5	11,0
17,0	4,5	6,0	11,5
18,0	6,0	6,0	12,0
26,0	<sup>(iii)</sup>	<sup>(iii)</sup>	16,0

(i) A espessura mínima permitida pelo Caltrans (1992) é de 3,0 cm;

(ii) No Brasil, por razões construtivas (considerando a granulometria e a viscosidade do asfalto-borracha), a espessura mínima é de 4,5 cm;

(iii) As espessuras do Caltrans (1992) devem ser compostas.

## 9. CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o desempenho mecânico de misturas asfálticas com asfalto-borracha produzido através do sistema *terminal blend*, com duas granulometrias (*dense graded e gap graded*). O desempenho obtido por estas misturas foi comparado à uma mistura convencional do tipo *dense graded* (DNIT Faixa “C”), confeccionada com CAP 50/70.

Inicialmente os asfaltos foram caracterizados em laboratório, cujos resultados mostraram que os asfaltos-borracha apresentam uma maior viscosidade, um mais elevado ponto de amolecimento e também uma maior recuperação elástica em relação ao asfalto convencional CAP 50/70.

Os ensaios de desempenho realizados foram a determinação do módulo dinâmico e resistência à fadiga utilizando o ensaio de flexão alternada em 4 pontos. Os ensaios de módulo dinâmico foram realizados de acordo com o preconizado na norma ASTM 3497 (1995). As misturas com asfalto-borracha apresentaram um módulo dinâmico inferior em relação à mistura convencional.

Os ensaios de fadiga foram realizados de acordo com a norma AASHTO TP8 (1994), no qual corpos-de-prova prismáticos, simplesmente apoiados nas extremidades foram submetidos a um carregamento sinusoidal alternado em extensão controlada. No ensaio foram realizadas 3 repetições para cada um dos níveis de extensões seleccionados (200, 400 e 800  $\mu\text{m/m}$ ), à temperatura de 20 °C e frequência de 10 Hz. Como resultado, foram obtidas as curvas de fadiga de cada mistura.

O dimensionamento do pavimento foi realizado utilizando-se como camada de revestimento as misturas com asfalto-borracha e a mistura convencional de referência. Numa primeira etapa a estrutura do pavimento foi dimensionada a partir da metodologia do DNIT (DNIT, 2006) e

posteriormente foi realizada a análise mecanicista. De acordo com a metodologia de dimensionamento do DNIT e posteriormente, foi realizada a análise mecanicista.

Através da análise mecanicista, para a mistura convencional, com um N de  $10^8$ , os cálculos resultaram em uma espessura de 26 cm. A partir das leis de fadiga obtidas, a análise mecanista mostrou que, uma camada de revestimento de 6 cm de espessura confeccionada com asfalto-borracha seria suficiente para suportar um N de  $10^8$ . Todavia, a experiência da prática de dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil levanta a dúvida de que esta espessura seria insuficiente para atender a um tráfego de  $10^8$ , mesmo com uma mistura de asfalto-borracha. A partir desta consideração procurou estabelecer-se para estas duas misturas a equivalência estrutural das misturas com asfalto-borracha em relação à mistura convencional, tomando como referência o estudo de redução de espessura estabelecido pelo Caltrans (1992).

Como resultado, as espessuras da camada de revestimento confeccionada em mistura com asfalto-borracha seria, para  $N = 10^8$ , de 16,0 cm. Assim, para as misturas asfálticas ensaiadas e para a estrutura dimensionada, a redução da espessura quando se utiliza uma mistura com elevada resistência à fadiga, com asfalto-borracha será de 10 cm.

## **AGRADECIMENTOS**

O primeiro autor agradece ao Programa ALβAN (Programa de Bolsas de Alto Nível da União Europeia para a América Latina), pela bolsa nº E04D040507BR durante os trabalhos em Portugal e ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa no Brasil. Agradece-se também à empresa Greca Asfaltos do Brasil pelo envio dos asfaltos e à Pedreira Bezerras de Portugal pelo fornecimento dos agregados.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ADOT (2005). ADOT Construction Manual. Arizona Department of Transportation, Intermodal Transportation Division, Arizona, USA.

Antunes, M.L.; Baptista, F.; Eusébio; M.I.; Costa, M.S.; Miranda, C.V. (2000). Characterization of Asphalt Rubber Mixtures for Pavement Rehabilitation Projects in Portugal. Asphalt Rubber 2000, Proceedings. Vilamoura, Portugal.

Asphalt Institute (1989). The Asphalt Handbook, (MS-4), 1989 Edition, Kentucky, USA.

Baker, T.E.; Allen, T.M.; Jenkins, D.V.; Mooney, T.M.; Pierce, L.M.; Christie, R.A.; Weston, J.T. (2003). Evaluation of the Use of Scrap Tires in Transportation Related Applications in the State of Washington. Report to the Legislature as Required by SHB 2308. Washington State Department of Transportation, Olympia, Washington, USA.

Caltrans (1992). Design Guide for ARHM-GG. California Department of Transportation. Division of New Technology, Materials and Research. Sacramento, California, USA.

Caltrans (2003<sub>A</sub>). Asphalt Rubber Usage Guide. State of California Department of Transportation. Materials and Testing Services. Office of Flexible Pavement Materials. Sacramento, California, USA.

Caltrans, (2003<sub>B</sub>). Maintenance Technical Advisory Guide (TAG), Caltrans. State of California Department of Transportation, Sacramento, California, USA.



Dantas Neto, S.A. (2004). Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas asfálticas Modificados com Borracha Granulada de Pneus Usados. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, DF, Brasil.

DNIT (2006). Manual de Pavimentação, 3ª Edição. Ministério dos Transportes – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT), Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação IPR 719. Rio de Janeiro, Brasil.

Hicks, R.G. (2002). Asphalt Rubber Design and Construction Guidelines, Volume I – Design Guidelines. Northern California Rubberized Asphalt Concrete Technology Center (NCRCTC) and California Integrated Waste Management Board (CIWMB). Sacramento, California, USA.

Holleram, G. (2000). Rubber Hits the Road. Pavement Maintenance Specialists. Sacramento, USA.

Monismith, C.L.; Epps, J.A.; Kasianchuk, A.; McLean, D.B. (1971). Asphalt Mixture Behaviour on Repeated Flexure. Report nº. TE 70-5, University of California, Berkeley, USA.

Morilha, Jr.A. & Greca, M.R. (2003). Asfalto-Borracha Ecoflex. Greca Asfaltos. Curitiba, Paraná, Brasil.

Roberts, F.L.; Kandhal, P.S.; Brown, E.R.; Dunning, R.L. (1989). Investigation and Evaluation of Ground Tire Rubber in Hot Mix Asphalt. National Center for Asphalt Technology nº 89-3. Auburn, Alabama, USA.

Preussler, E.S. & Pinto, S. (2001). Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis. Editora Copiarte. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Shatnawi, S. & Holleran, G. (2003). Asphalt Rubber Maintenance Treatments in California. Asphalt Rubber 2003, Proceedings. Brasília, Brazil.

Shatnawi, S. & Long, B. (2000). Performance of Asphalt Rubber as Thin Overlays. Asphalt Rubber 2000, Proceedings. Vilamoura, Portugal.

Silva, H.M.R.D. (2006). Caracterização do Mástique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mástique – Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Sousa, J.B.; Solaimanian, M.; Weissman, S.L. (1994). Development and Use of the Repeated Shear Test (Constant Height): an Optional Superpave Mix Design Tool. SHRP-A-698. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, DC, USA.

Sousa, J.B.; Fonseca, P.; Freire, A.; Pais, J.C. (1999). Comparação da Vida à Fadiga e Deformação Permanente entre Misturas com Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus Convencionais. Relatório Consulpav EST 99-07. Portugal.