

# **MODELAGEM DO EFEITO DA BORRACHA MOÍDA E DO RESÍDUO DE ÓLEO DE XISTO SOBRE O MÓDULO DE RESILIÊNCIA**

**Manoel Henrique Alba Sória, DSc.**

**Adalberto Leandro Faxina, DSc.**

**Fernanda Pilati**

**Glauco Tulio Pessa Fabbri, DSC.**

**Antonio Carlos Gigante**

Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

**Leni Figueiredo Mathias Leite, DSc.**

Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello (Cenpes), Petrobras

## **RESUMO**

O objetivo deste trabalho é avaliar os efeitos da borracha moída e do resíduo de óleo de xisto sobre o módulo de resiliência de misturas asfálticas densas. Foram empregados oito ligantes asfálticos, compostos por proporções distintas de borracha moída e de resíduo de óleo de xisto. Os módulos totais obtidos foram submetidos à análise estatística, que compreendeu o ajuste de modelos e as análises de efeitos dos componentes e de superfície de resposta. A borracha tende a reduzir o módulo, para concentrações de intermediárias a altas, por exemplo, acima de 8%. O efeito do óleo é linear, provocando redução do módulo a uma taxa na faixa de 400 a 500 MPa para cada 1% de óleo adicionado. Valores mais altos de módulo são obtidos para concentrações de baixas a intermediárias de borracha e baixas de óleo e módulos mais baixos são obtidos para concentrações altas de borracha e de óleo.

## **ABSTRACT**

This research intends to evaluate the effects of crumb rubber and shale-oil residue on the modulus of resilience of dense-graded hot mix asphalt mixes. Eight asphalt binders were used, compounded with different proportions of crumb rubber and shale-oil residue. The total modulus was monitored and the data was submitted to statistical analysis, that comprehended model fitting, the analysis of effects of the components and the response surface analysis. Rubber reduces the total modulus, when intermediate to high concentrations are added, as, for example, higher than 8%. Oil has a linear effect, reducing the total modulus at a rate ranging from 400 to 500 MPa per 1% added. Higher modulus are obtained when low to intermediate concentrations of rubber and low concentrations of oil are used and lower modulus are obtained when high concentrations of rubber and oil are used.

## **1. INTRODUÇÃO**

O entendimento dos efeitos que os modificadores têm sobre as propriedades dos ligantes asfálticos e das misturas asfálticas é um elemento fundamental na seleção das concentrações adequadas dos componentes a serem adicionadas ao ligante asfáltico de base. A técnica de experimentos com misturas (Cornell, 2002) tem sido empregada com êxito na formulação de ligantes asfalto-borracha (Faxina, 2006), a exemplo das demais aplicações nas áreas alimentícia, farmacêutica e outras, em que se procura modelar os efeitos que as proporções dos componentes têm sobre propriedades de interesse. A modelagem dos efeitos das proporções dos modificadores sobre as propriedades de interesse na pavimentação permite a previsão para condições não-testadas, evitando trabalho extra para compor amostras em condições específicas, o que facilita o desenvolvimento de pesquisas e a avaliação de materiais.

Este trabalho tem por objetivo a avaliação dos efeitos da variação nas proporções de borracha moída e de resíduo de óleo de xisto, empregado como óleo extensor, sobre o módulo de resiliência de misturas asfálticas densas. Oito ligantes asfálticos, compostos com proporções diversas destes modificadores, foram preparados e empregados na confecção de corpos-de-prova, em cinco teores de ligante asfáltico, que foram submetidos a ensaios de módulo de resiliência, na temperatura de 25°C. Modelos de regressão para o módulo de resiliência foram ajustados, empregando dois métodos de cálculo, o da norma AASHTO TP 31 e o do NCHRP

Project 1-28. Com base nestes modelos, foram gerados os gráficos de efeitos dos componentes e as superfícies de resposta, a fim de avaliar os efeitos isolados e de interação entre os três componentes, o ligante asfáltico, a borracha moída e o resíduo de óleo de xisto.

## **2. INFLUÊNCIA DA BORRACHA MOÍDA SOBRE O MÓDULO DE RESILIÊNCIA**

Segundo Epps (1994), os valores de módulos de resiliência das misturas com asfalto-borracha podem ser maiores ou menores que os obtidos para misturas convencionais, dependendo de vários fatores. Tipicamente, valores menores são obtidos em misturas contendo asfalto-borracha. Ayres e Witczak (1995) verificaram que misturas asfálticas usando ligante asfalto-borracha apresentam valores de módulo de resiliência correspondentes a 80 a 90% dos valores obtidos para a mistura de referência (CAP 20). Estes autores verificaram que os valores de módulo de resiliência diminuíram com o aumento da proporção de borracha.

Leite *et al.* (2000) observaram uma redução de aproximadamente 50% no valor do módulo de resiliência de misturas empregando ligante asfalto-borracha, em relação às misturas convencionais (CAP 20). Nos estudos de Faxina (2002), foi constatada uma diminuição nos valores do módulo de resiliência de misturas modificadas com borracha e resíduo de óleo de xisto, indicando que a adição desses componentes torna as misturas mais flexíveis. Cordeiro (2006) corrobora as conclusões destes dois autores, afirmando que a adição de borracha contribui para pavimentos mais flexíveis, diminuindo a formação de trincas por fadiga ou mesmo trincas térmicas. Lemes (2004) verificou o aumento do módulo de resiliência de misturas asfálticas com ligante asfalto-borracha, quando submetidas a envelhecimento a curto prazo.

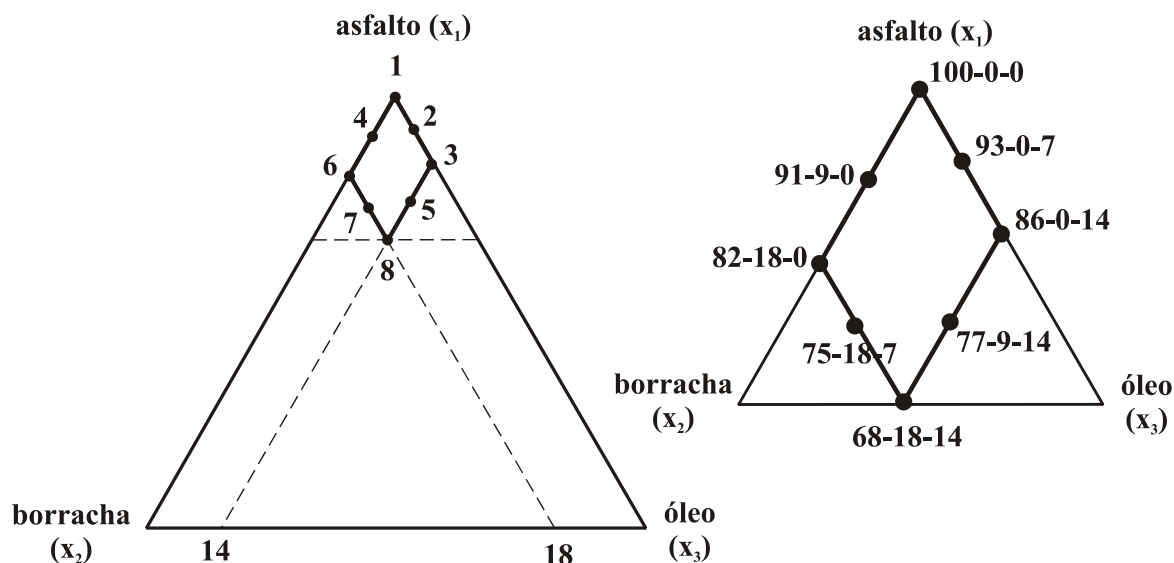
## **3. DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO**

As misturas asfálticas avaliadas foram compostas com ligantes asfálticos selecionados com base em um experimento delineado por meio da técnica estatística de “experimentos com misturas” (Cornell, 2002), com restrições nas proporções dos componentes. Chamando  $x_1$  o teor de ligante asfáltico,  $x_2$  o teor de borracha moída e  $x_3$  o teor de resíduo de óleo de xisto, as restrições impostas, em porcentagem, foram:  $0,68 \leq x_1 \leq 1,00$ ,  $0,00 \leq x_2 \leq 0,18$  e  $0,00 \leq x_3 \leq 0,14$ . Outras duas restrições, provenientes da teoria de experimentos com misturas, foram impostas:  $x_i \geq 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, q$ , sendo  $q$  o número de componentes da mistura, e  $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ .

A Figura 1 ilustra o simplex e a sub-região delimitada para o experimento, onde estão indicadas as misturas projetadas. Temperatura, tempo e velocidade de agitação são variáveis de processo intervenientes sobre as características do asfalto-borracha, mas não foram incluídas neste experimento. Os ligantes asfálticos obtidos do delineamento do experimento foram: 100-0-0, 93-0-7, 86-0-14, 91-9-0, 77-9-14, 82-18-0, 75-18-7 e 68-18-14, onde o primeiro número corresponde ao teor de asfalto, o segundo ao teor de borracha e o terceiro ao teor de óleo. O experimento foi delineado de forma a ajustar um modelo polinomial de terceiro grau, específico para problemas com misturas, denominado modelo cúbico especial (Cornell, 2002).

O agregado mineral não é considerado um quarto componente, o que tornaria o experimento mais complexo. Como a porcentagem de agregado no corpo-de-prova não muda (1.200 g) e cada modelo é definido para teores controlados de ligante asfáltico, assume-se que as porcentagens de agregado mineral e de ligante asfáltico são constantes nas oito misturas asfálticas, para cada teor de ligante asfáltico. Assim, é possível avaliar o efeito das variações

dos teores de asfalto, de borracha e óleo sobre as propriedades volumétricas das misturas asfálticas, admitindo que as interferências sobre os valores das propriedades sejam devidas exclusivamente às variações nas porcentagens desses componentes.



**Figura 1:** Simplex do experimento, sub-região delimitada e ligantes asfálticos escolhidas

#### 4. MATERIAIS EMPREGADOS

A borracha, cuja composição granulométrica é mostrada na Tabela 1, foi produzida pela empresa Artgoma S.A., de São Paulo, SP, obtida da trituração de pneus de veículos pesados. O ensaio de termogravimetria indicou a presença de 64,3% de polímeros e plastificantes, 31,4% de negro de fumo e 4,3% de material inorgânico na composição química da borracha. O cimento asfáltico de petróleo CAP 30/45, com classificação PG 70-10 pela especificação Superpave, foi empregado como ligante asfáltico de base. O ligante asfáltico de base apresentou penetração de 32 (0,1mm) e ponto de amolecimento de 54,1°C.

O resíduo de óleo de xisto, tipo AR-5 conforme especificação ASTM D 4552, foi fornecido pela Unidade de Negócios da Industrialização do Xisto (SIX-Petrobras), de São Mateus do Sul, PR. O agregado mineral foi fornecido pela Pedreira Said, de Ribeirão Preto, SP, e é oriundo da britagem de rocha basáltica. A composição granulométrica das misturas asfálticas, correspondente ao centro da faixa C do DER-SP, foi obtida por separação dos agregados nas frações correspondentes a cada uma das peneiras desta especificação e posterior misturação. O agregado apresenta Abrasão Los Angeles de 11% e a massa específica aparente da composição é de 2,873.

**Tabela 1:** Composição granulométrica da borracha empregada

abertura da peneira, mm	1,19	0,59	0,42	0,297	0,175	0,150	0,074	fundo
% passada	100,0	99,24	59,74	44,99	15,84	11,31	2,46	0,00

#### 5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A rotina de laboratório foi dividida em três etapas: preparação dos ligantes asfálticos, moldagem dos corpos-de-prova e obtenção das medidas de módulo de resiliência. Foram

preparados oito ligantes asfálticos, em conformidade com o delineamento do experimento, e, em seguida, foram confeccionados corpos-de-prova em cinco teores de ligante asfáltico. A densidade efetiva do agregado mineral foi determinada segundo o método Rice (ASTM D 2041-00) e a densidade aparente da composição granulométrica foi obtida da ponderação das densidades aparentes dos materiais miúdo e graúdo nas porcentagens em que são empregados, obtidas pelos métodos ASTM C 128-93 e ASTM C 127-91. Foi considerado material graúdo o retido na peneira de malha #4,8 mm e material miúdo o material passado na peneira de malha #4,8 mm. O agregado mineral empregado apresenta valores baixos de absorção de ligante asfáltico e, por isso, a absorção não foi considerada nos cálculos. Foi empregado um único valor de densidade efetiva para cada ligante asfáltico, corrigido para os teores utilizados.

### 5.1. Preparação dos ligantes asfálticos

As composições contendo apenas asfalto e borracha e aquelas contendo asfalto, borracha e óleo foram processadas a 170°C, durante 90 min, a uma velocidade de 4.000 rpm, em misturador de alto cisalhamento, marca Silverson, modelo L4RT. As composições contendo apenas asfalto e óleo foram processadas a 135°C, durante 25 min, sob rotação de 400 rpm em misturador de baixo cisalhamento, marca Fisatom, modelo 722D. Foram compostos sete ligantes asfálticos, aos quais se soma a mistura de referência (CAP 30/45), totalizando oito ligantes asfálticos.

### 5.2. Moldagem dos corpos-de-prova

O agregado mineral foi aquecido em uma misturadora de massa adaptada para este fim e, em seguida, foi adicionado o ligante asfáltico e realizada a homogeneização do material. Em seguida, foram separadas porções de 1.200 g, armazenadas em tigelas metálicas, que foram acondicionadas em estufa pelo período de 2 h na temperatura de compactação. Foram empregados cinco teores de ligante asfáltico, 4,5, 5,0, 5,5, 6,0 e 6,5%, sendo compactados sete corpos-de-prova para cada teor. Todas as misturas asfálticas foram compactadas nestes teores, por se tratar de um requisito do delineamento do experimento. A Tabela 2 apresenta as temperaturas de usinagem e de compactação.

**Tabela 2:** Temperaturas de usinagem e de compactação (°C)

ligante asfáltico	100-0-0	91-9-0	82-18-0	93-0-7	86-0-14	75-18-7	77-9-14	68-18-14
usinagem	158	165	180	150	143	175	155	165
compactação	148	155	170	140	132	165	145	155

### 5.3. Obtenção dos dados de módulo de resiliência

Foram empregados na modelagem os módulos totais, obtidos a 25°C, e determinados por meio de dois métodos de cálculo, referenciados no texto como AASTHTO (norma AASTHTO TP 31) e NCHRP (NCHRP Project 1-28). Foram aplicados 100 ciclos de carregamento com 1 s de duração cada, com carregamento de 0,1 s e repouso de 0,9 s. O módulo de resiliência total representa a recuperação da deformação provocada pelo carregamento e é obtido com base no deslocamento total recuperado durante o período de descarregamento e repouso. Segundo a norma da AASTHTO, o deslocamento total é dado pela diferença entre o deslocamento máximo do ciclo de carregamento e o deslocamento registrado no final do ciclo. Já para o procedimento do NCHRP, o deslocamento total é obtido pela diferença entre o deslocamento máximo do ciclo de carregamento e a média dos deslocamentos registrados no intervalo de 85 a 95% da parcela de repouso do ciclo. Foram ensaiadas sete réplicas por condição, totalizando 280 medidas.

## 6. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE

Para a realização da modelagem estatística, foi empregado o pacote estatístico Minitab, versão 14.1. A análise dos resíduos foi realizada por meio de inspeção visual, para a verificação de tendências, e do teste de Anderson-Darling, para verificar a ocorrência de distribuição normal dos resíduos. O efeito da multicolinearidade, normalmente presente em regiões experimentais altamente delimitadas, não foi considerado neste estudo, uma vez que a modelagem está direcionada exclusivamente para previsão. O modelo empregado na regressão é denominado modelo cúbico especial, com o formato geral indicado na equação 1. Tais modelos são denominados modelos canônicos e são específicos para modelagem de problemas de misturas.

$$\eta = \sum_{i=1}^q \beta_i^0 x_i + \sum_{i < j} \sum_{j=1}^q \beta_{ij}^0 x_i x_j + \sum_{ijk} \beta_{ijk}^0 x_i x_j x_k \quad (1)$$

com  $i, j, k = 1, 2, \dots, q$ , sendo  $q$  o número de componentes da mistura,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ij}$  e  $\beta_{ijk}$  as estimativas dos coeficientes dos termos  $x_i$ ,  $x_{ij}$  e  $x_{ijk}$ , respectivamente,  $x_i$ ,  $x_j$  e  $x_k$  correspondentes aos teores de CAP, de borracha e de óleo, respectivamente.

A análise estatística se baseia na avaliação dos gráficos de efeitos dos componentes e das superfícies de resposta. Um gráfico de efeitos dos componentes mostra o efeito que cada componente, isoladamente, tem sobre a resposta, com base no modelo adotado. Este tipo de gráfico indica o efeito da variação da proporção de um dado componente, mantendo constante a relação entre proporções dos demais. Isto quer dizer que ao avaliar o efeito da variação da proporção de borracha, por exemplo, as proporções de asfalto e de óleo na mistura também variam, mas a relação entre estes últimos dois componentes se mantém constante. Cada linha no gráfico indica o efeito de mudar o componente correspondente em uma linha imaginária (direção) conectando a mistura de referência (normalmente o centróide da região experimental) ao vértice da região experimental e a mistura de referência ao lado oposto ao vértice.

Deve-se ressaltar que a análise de efeitos de componentes exposta por este tipo de gráfico é apenas uma dentre muitas possibilidades de análise (várias direções). A direção escolhida, nesta análise, corresponde à reta ligando o vértice ao lado oposto da região experimental, passando pela mistura de referência, que, neste caso, é o centróide da região delimitada na Figura 1. Esse tipo de gráfico pode ser empregado para identificar o componente que influencia mais a resposta. A amplitude horizontal indica a faixa de variação da proporção dos componentes, nos limites indicados no delineamento do experimento, partindo da mistura de referência para +50% da faixa de variação e para -50% desta faixa. A amplitude vertical indica a intensidade do efeito da variação da proporção do componente na mistura sobre a propriedade. Uma maneira mais rápida de analisar os efeitos é ver a porcentagem de cada componente aumentando da direita para a esquerda, dentro da sua respectiva faixa de variação.

Ao interpretar um gráfico de efeitos de componentes, é necessário observar que: (a) todos os componentes são interpretados em relação à mistura de referência; (b) os componentes que apresentam maior efeito na resposta apresentarão curvas com maior inclinação; (c) componentes que apresentam faixas mais amplas de ocorrência (limite superior – limite inferior) apresentarão curvas mais extensas, componentes com faixas mais restritas apresentarão curvas mais curtas; (d) o efeito total de um componente depende da sua faixa de

ocorrência e da inclinação da curva correspondente; o efeito total de um componente é definido pela diferença na resposta entre o ponto na curva correspondente ao seu limite superior e o ponto na curva correspondente ao seu limite inferior; (e) componentes com curvas aproximadamente horizontais, em relação à mistura de referência, não apresentam virtualmente nenhum efeito sobre a resposta; (f) componentes com curvas semelhantes apresentarão efeitos semelhantes sobre a resposta; e (g) os componentes não têm efeitos totalmente isolados, uma vez que alterar a proporção de um implica em alterar a de pelo menos um dos complementares.

Enquanto analisando os gráficos de efeitos de componentes, é importante ter em mente que estes resultados são obtidos ao se caminhar ao longo de uma dada direção dentro do simplex. Outras análises são possíveis em outras direções. Este tipo de gráfico representa um artifício estatístico para tentar entender como cada componente afeta a resposta individualmente, uma vez que não é possível variar a proporção de um componente mantendo constantes as proporções dos demais. Em termos práticos, os três componentes atuam em conjunto e os efeitos deles sobre a resposta dependem dos efeitos de interação entre eles. Estes efeitos de interação dependem das proporções dos componentes e são ilustrados de uma forma mais efetiva e realística pelas superfícies de resposta.

As superfícies de resposta permitem mostrar como uma resposta se relaciona com os componentes da mistura, com base no modelo adotado. A superfície de resposta representa um plano bidimensional, no qual todos os pontos que apresentam a mesma resposta estão conectados para produzir curvas de nível. As superfícies de resposta são úteis para estabelecer valores ideais de uma dada propriedade e as misturas ideais correspondentes. Representam uma ferramenta efetiva na determinação de regiões em que o resíduo de óleo de xisto pode ser empregado em conjunto com a borracha, funcionando, eventualmente, como um óleo extensor.

## **7. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

A Tabela 3 apresenta os modelos de regressão referentes ao módulo de resiliência total, a 25°C, obtidos pelos métodos AASHTO e NCHRP, para os teores de ligante asfáltico de 4,5, 5,0, 5,5, 6,0 e 6,5%. As Figuras de 2 e 3 trazem os gráficos de efeitos dos componentes e as superfícies de resposta, respectivamente, para o módulo total no teor de ligante asfáltico de 4,5%. As Figuras 4 e 5 apresentam estes mesmos gráficos para o módulo total a 5,0%. As Figuras 6 e 7 mostram estes gráficos para o módulo total a 5,5%. As Figuras 8 e 9 mostram estes gráficos para o módulo total a 6,0%. As Figuras 10 e 11 trazem estes gráficos para o módulo total a 6,5%. Tanto os gráficos de efeitos dos componentes quanto as superfícies de resposta foram gerados com base nos modelos de regressão apresentados na Tabela 3.

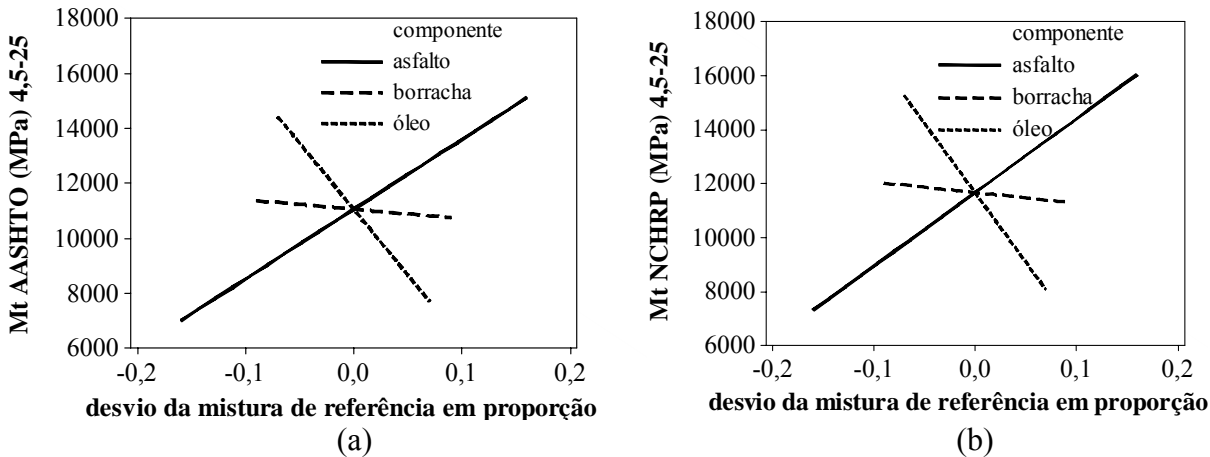
Os gráficos de efeitos dos componentes representados na Figura 2 indicam que a borracha e o óleo reduzem o módulo total, no teor de ligante asfáltico de 4,5%, sendo o efeito do óleo mais intenso que o da borracha. No caso dos módulos obtidos pelo procedimento da AASHTO, a borracha reduz o módulo à taxa de 35 MPa por 1% de borracha adicionada e o óleo à taxa de 477MPa/1%. Para os módulos obtidos pelo procedimento NCHRP, a borracha reduz o módulo à taxa de 43MPa/1% e o óleo à taxa de 514MPa/1%. O procedimento NCHRP, portanto, aponta que os efeitos dos componentes têm intensidade ligeiramente superior à intensidade dos efeitos obtidos pelo procedimento da AASHTO. Os modelos lineares geram superfícies de resposta com curvas de nível retas (Figura 3), cujo formato indica a pequena influência da borracha. Módulos totais mais elevados são obtidos por misturas compostas com teores baixos de borracha e de óleo (topo da região experimental) e módulos totais mais baixos são obtidos por

misturas compostas com teores altos de borracha e de óleo (parte inferior da região experimental).

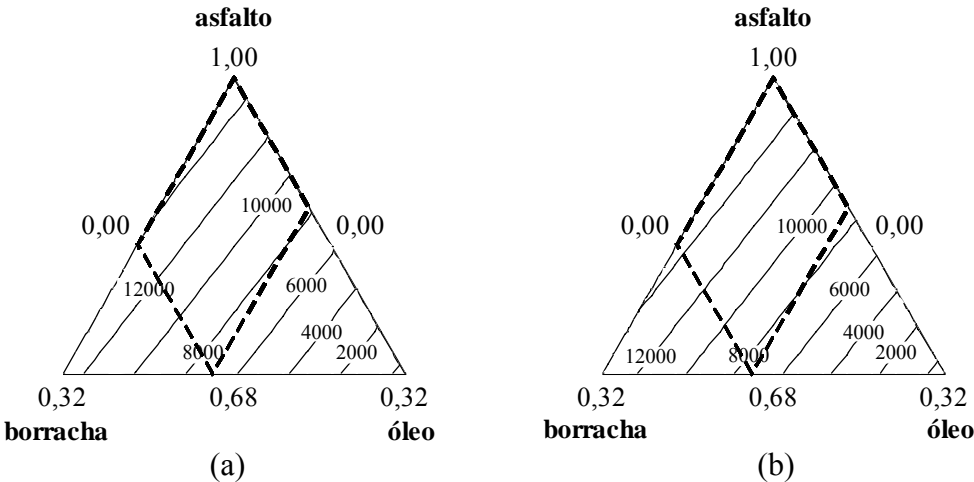
**Tabela 3:** Modelos de regressão do módulo de resiliência total (MPa)

propriedade	modelo de regressão	R <sup>2</sup> (%)	n
M <sub>t</sub> AASHTO 4,5%	= 15.100x <sub>1</sub> +7.893x <sub>2</sub> –33.538x <sub>3</sub>	64,5	55
M <sub>t</sub> AASHTO 5,0%	= 16.709x <sub>1</sub> –228.251x <sub>2</sub> –54.181x <sub>3</sub> +256.188x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> –829.002x <sub>2</sub> x <sub>3</sub> +1.837.430x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	96,7	54
M <sub>t</sub> AASHTO 5,5%	= 14.988 x <sub>1</sub> –129.848x <sub>2</sub> +145.248x <sub>3</sub> +161.236x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> –217.952x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	90,7	55
M <sub>t</sub> AASHTO 6,0%	= 14.758x <sub>1</sub> –96.283x <sub>2</sub> –63.478x <sub>3</sub> +112.993x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> +541.389x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	95,2	53
M <sub>t</sub> AASHTO 6,5%	= 12.304x <sub>1</sub> –150.432x <sub>2</sub> +217.702x <sub>3</sub> +180.505x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> –302.847x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	97,5	51
M <sub>t</sub> NCHRP 4,5%	= 16.020x <sub>1</sub> +8.078x <sub>2</sub> –36.074x <sub>3</sub>	64,7	55
M <sub>t</sub> NCHRP 5,0%	= 18.088x <sub>1</sub> –228.958x <sub>2</sub> –60.558x <sub>3</sub> +252.937x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> –1.040.055x <sub>2</sub> x <sub>3</sub> +2.177.294x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	97,1	53
M <sub>t</sub> NCHRP 5,5%	= 16.029x <sub>1</sub> –137.346x <sub>2</sub> +150.763x <sub>3</sub> +169.688x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> –228.335x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	91,5	55
M <sub>t</sub> NCHRP 6,0%	= 15.878x <sub>1</sub> –110.275x <sub>2</sub> –70.401x <sub>3</sub> +128.196x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> +606.570 x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	94,5	54
M <sub>t</sub> NCHRP 6,5%	= 13.096x <sub>1</sub> –162.621x <sub>2</sub> +233.311x <sub>3</sub> +194.292x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> –325.139x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	97,6	51

x<sub>1</sub>: proporção de CAP; x<sub>2</sub>: proporção de borracha; x<sub>3</sub>: proporção de óleo

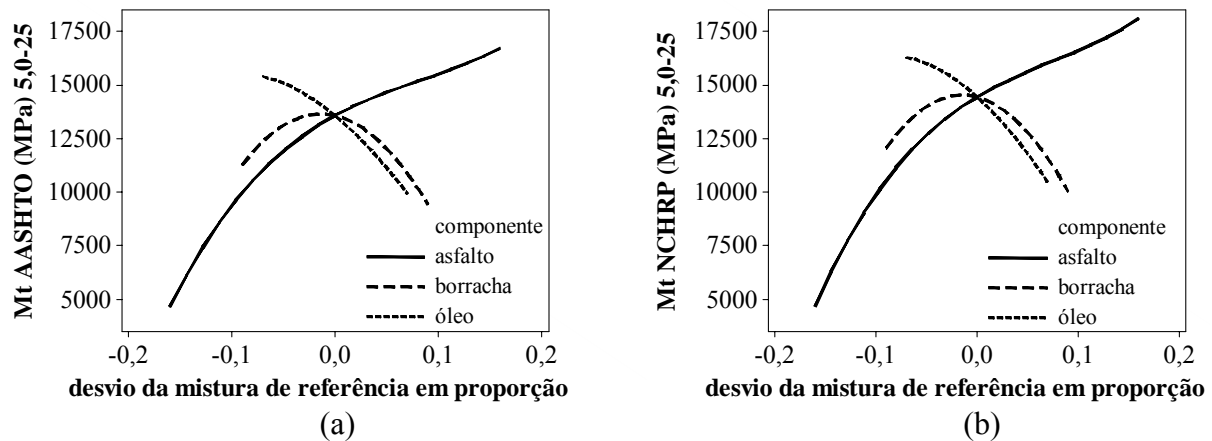


**Figura 2:** Efeitos dos componentes sobre os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 4,5%

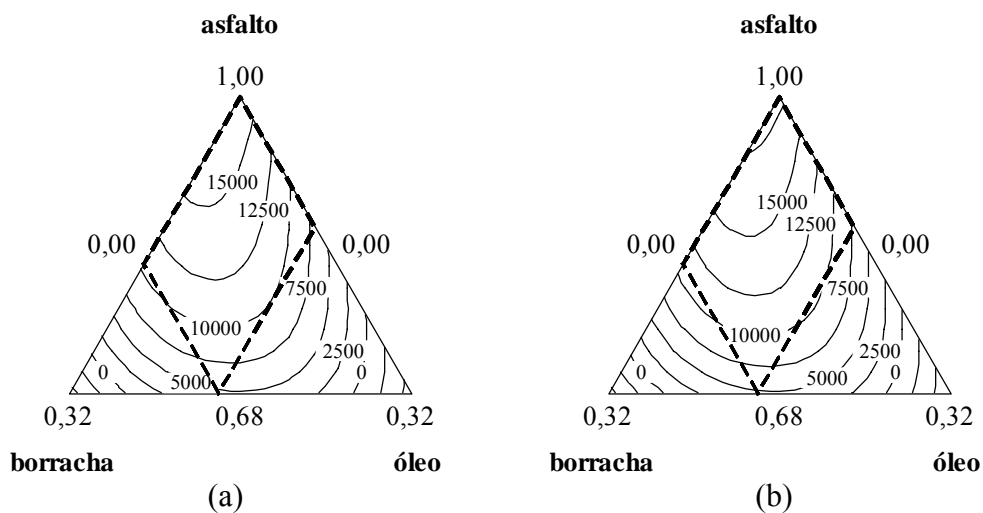


**Figura 3:** Superfícies de resposta para os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 4,5%

A Figura 4 indica que, no teor de ligante asfáltico de 5,0%, o efeito da borracha é parabólico: o módulo total aumenta para concentrações de borracha entre 0 e 8% e diminui a partir deste limite. Nos teores de 5,5, 6,0 e 6,5%, o efeito da borracha também é parabólico, com ponto de máximo em torno da mistura de referência. Nos teores de 5,5% (Figura 6) e 6,5% (Figura 10), o módulo aumenta para concentrações de borracha entre 0 e 8%. No teor de 6,0% (Figura 8), o ponto de máximo ocorre próximo dos 11% de borracha. Em linhas gerais, a borracha tende a reduzir o módulo total, desde que sejam empregados teores de intermediários a altos, por exemplo, acima de 8%. Quando são empregados teores de baixos a intermediários, a borracha tende a aumentar o módulo, o que aparentemente poderia causar surpresa. Esse comportamento inesperado poderia ser entendido como resultante de efeitos de interação entre os componentes.



**Figura 4:** Efeitos dos componentes sobre os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 5,0%

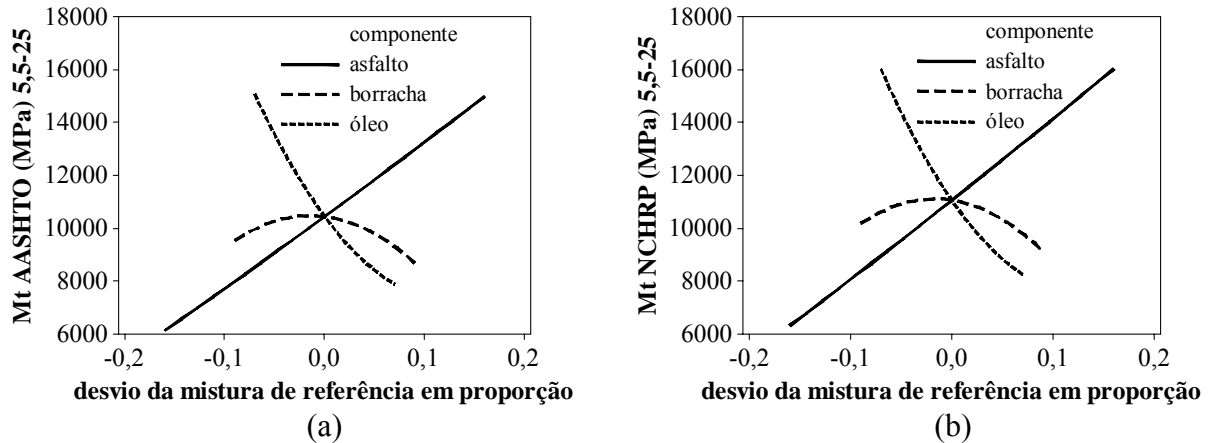


**Figura 5:** Superfícies de resposta para os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 5,0%

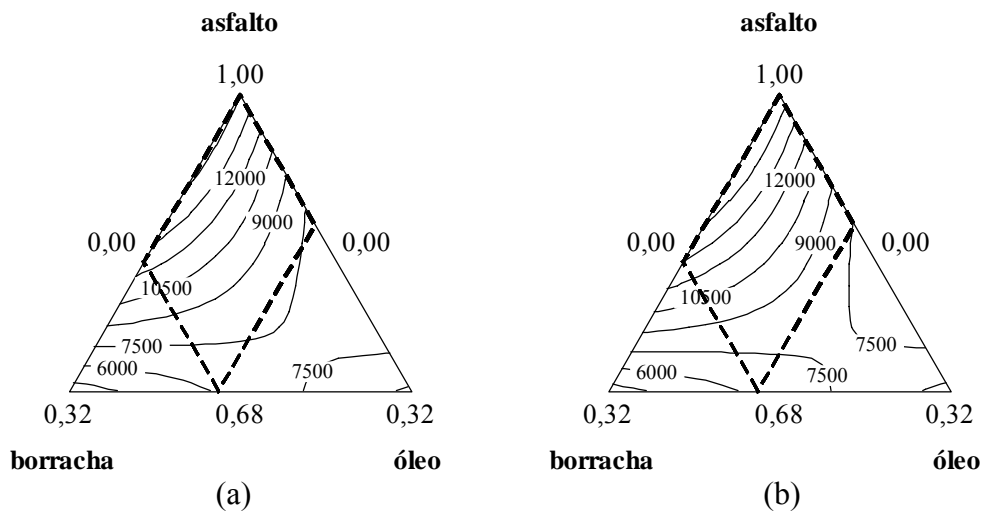
Em relação ao efeito do óleo, a Figura 4 mostra uma tendência aproximadamente linear, em que teores baixos têm efeito pouco expressivo. A tendência linear se mantém nos demais teores de ligante asfáltico, porém com características específicas. Nos teores de 5,5 e 6,5%, o efeito do óleo sobre o módulo é pouco expressivo nos teores altos. Já no teor de 6,0, o efeito do óleo é linear para todas as concentrações. No teor de 5,0%, o óleo reduz o módulo à taxa de 390 MPa



para cada 1% adicionado, quando é obtido pelo procedimento AASHTO, e à taxa de 412 MPa/1%, pelo procedimento NCHRP. No teor de 5,5%, estas taxas são 512 e 549. No teor de 6,0, estas taxas são 507 e 556 e, no teor de 6,5%, estas taxas são 433 e 467. Estas taxas variam com o teor de ligante asfáltico, porém são sempre menores para o módulo total obtido pelo procedimento AASHTO.



**Figura 6:** Efeitos dos componentes sobre os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 5,5%

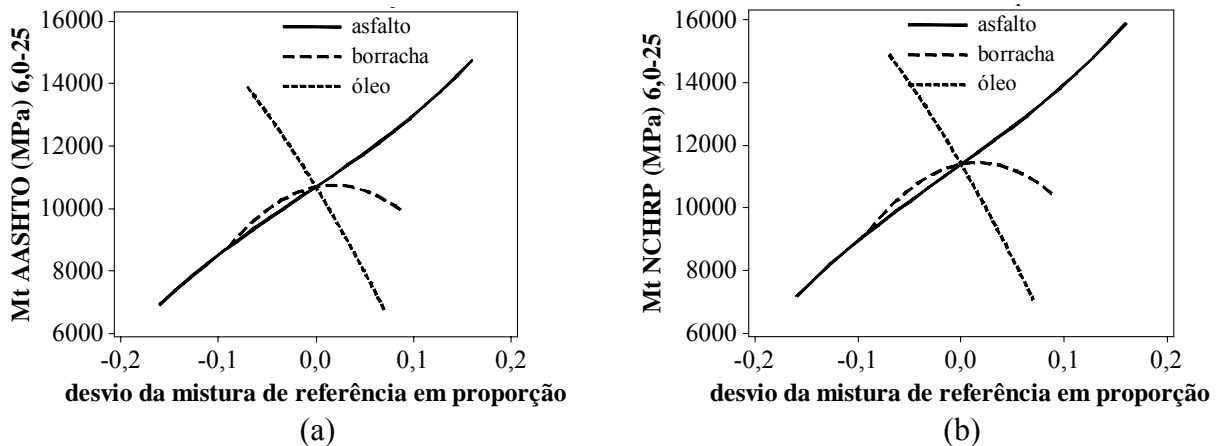


**Figura 7:** Superfícies de resposta para os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 5,5%

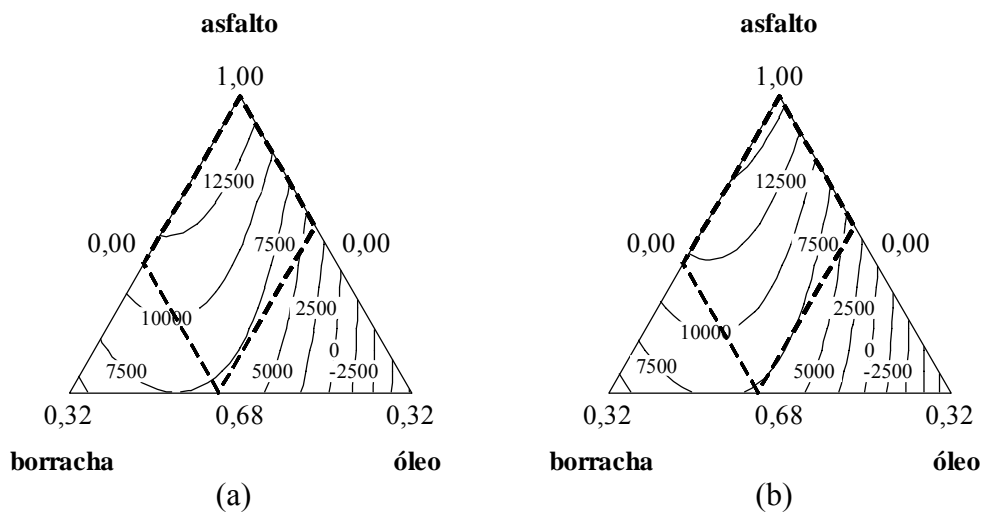
A Figura 5 indica que os valores mais altos de módulo são obtidos para concentrações de baixas a intermediárias de borracha e baixas de óleo (parte superior da região experimental). Este padrão se repete nos teores de 5,5, 6,0 e 6,5%, seja o módulo obtido pelo procedimento AASHTO ou NCHRP. Já módulos mais baixos podem ser obtidos para concentrações altas de borracha e de óleo nos teores de 5,0, 5,5 e 6,5% (parte inferior da região experimental). Módulos mais baixos também podem ser obtidos para concentrações baixas de borracha e altas de óleo no teor de 6,5% (à direita da região experimental). No teor de 6,0%, os menores valores de módulo são obtidos apenas para misturas com proporções baixas de borracha e altas de óleo.

É natural associar os diferentes comportamentos constatados nos gráficos de efeitos dos

componentes sobre as propriedades monitoradas à influência do teor de ligante asfáltico presente na mistura. No entanto, é importante lembrar que estes gráficos são provenientes de modelos cujos coeficientes foram ajustados com base nas amostras disponíveis. A variabilidade inerente aos dados determina se um certo coeficiente será estatisticamente significativo ou não, no nível de confiança de 95%, gerando modelos em que nem todos os termos estão presentes. Os diferentes comportamentos observados nestes gráficos são, portanto, influenciados pelo teor de ligante asfáltico, mas também pelos termos presentes no modelo, o que não permite atribuir estas diferenças apenas ao teor de ligante asfáltico.



**Figura 8:** Efeitos dos componentes sobre os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 6,0%

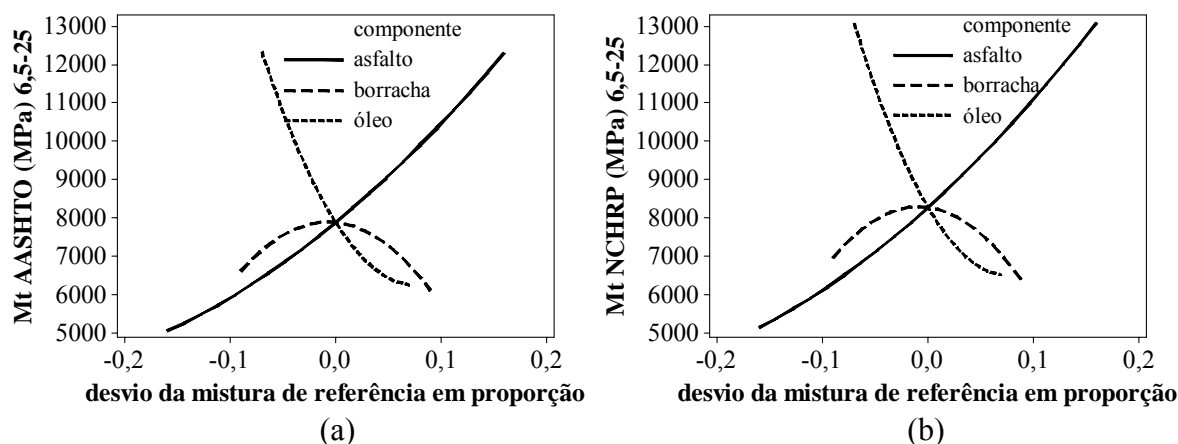


**Figura 9:** Superfícies de resposta para os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 6,0%

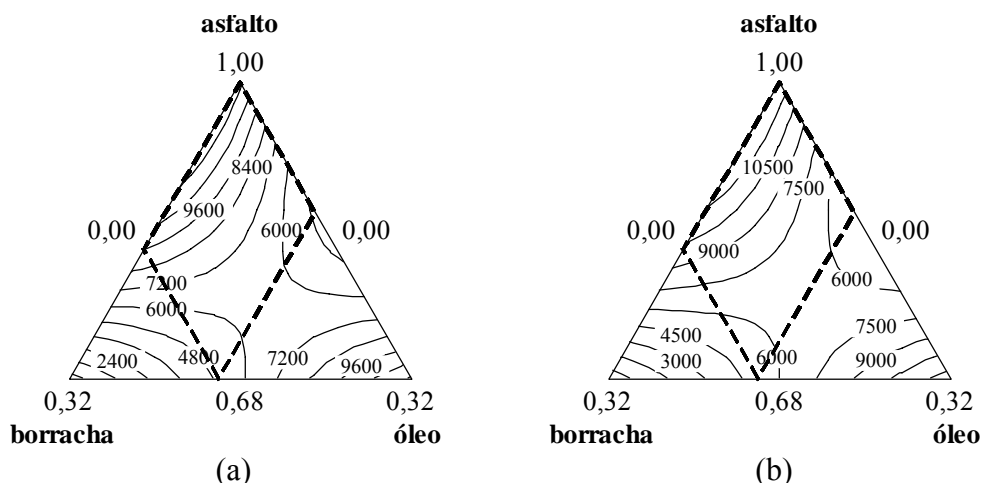
## 8. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram avaliados os efeitos da borracha moída e do resíduo de óleo de xisto sobre os módulos totais, na temperatura de 25°C, obtidos por dois procedimentos: o da norma AASHTO TP 31 e o do NCHRP. Foram monitorados os módulos totais de oito misturas asfálticas, empregando ligantes asfálticos compostos com borracha moída e resíduo de óleo de xisto, nos teores de ligante asfáltico de 4,5, 5,0, 5,5, 6,0 e 6,5%. Os dados obtidos foram empregados no ajuste de modelos polinomiais de terceiro grau, com base nos quais foram

obtidos gráficos de efeitos de componentes e superfícies de resposta destinados à análise dos efeitos isolados e de interação entre os componentes.



**Figura 10:** Efeitos dos componentes sobre os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 6,5%



**Figura 11:** Superfícies de resposta para os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 6,5%

Em linhas gerais, o efeito da borracha sobre os módulos totais é parabólico, com ponto de máximo em torno da mistura de referência. Nos teores de ligante asfáltico de 5,0, 5,5 e 6,5%, a borracha aumenta o módulo para concentrações entre 0 e 8% e o reduz nas concentrações superiores. No teor de 6,0%, a borracha aumenta o módulo para concentrações entre 0 e 11% e o reduz para concentrações superiores. A borracha tende a reduzir o módulo total, desde que sejam empregados teores de intermediários a altos, como os indicados. Quando são empregadas concentrações de baixas a intermediárias, a borracha tende a aumentar o módulo, o que aparentemente poderia causar surpresa. Esse comportamento inesperado poderia ser entendido como resultante de efeitos de interação entre os componentes. Apenas no teor de 4,5% o efeito da borracha é linear, atuando no sentido de diminuir o módulo total a uma taxa aproximada de 40 MPa para cada 1% de borracha adicionada.

O efeito do óleo sobre o módulo total, em linhas gerais, é linear, com características específicas, em função do teor de ligante asfáltico. O óleo provoca redução do módulo total a

uma taxa na faixa de 400 a 500 MPa para cada 1% adicionado, dependendo do teor de ligante asfáltico. Em alguns teores, constatou-se que o efeito do óleo é pouco expressivo sobre o módulo total quando se emprega concentrações baixas (no teor de ligante asfáltico de 5,0%) ou concentrações altas (nos teores de 5,5 e 6,5%).

A análise das superfícies de resposta indicou que valores mais altos de módulo são obtidos para concentrações de baixas a intermediárias de borracha e baixas de óleo (parte superior da região experimental), para os teores de ligante asfáltico de 5,0, 5,5, 6,0 e 6,5%, seja o módulo obtido pelo procedimento AASHTO ou NCHRP. No teor de 4,5%, módulos totais mais altos são obtidos por misturas com teores baixos de borracha e de óleo. Já módulos mais baixos podem ser obtidos para concentrações altas de borracha e de óleo nos teores de 4,5, 5,0, 5,5 e 6,5% (parte inferior da região experimental). Módulos mais baixos também podem ser obtidos para concentrações baixas de borracha e altas de óleo no teor de 6,5% (à direita da região experimental). No teor de 6,0%, os menores valores de módulo são obtidos apenas para misturas com proporções baixas de borracha e altas de óleo.

#### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à SIX-Petrobras, pelo fornecimento do óleo de xisto, ao Cenpes-Petrobras pela disponibilização do laboratório para a preparação das amostras e realização de ensaios, à Artgoma S.A. pelo fornecimento da borracha moída, à FAPESP pela concessão de Auxílio à Pesquisa ao primeiro autor e de bolsa de doutorado ao segundo autor e à Capes pela concessão de bolsa de mestrado para o terceiro autor.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Ayres, M. e M. W. Witzak (1995). Resilient modulus properties of asphalt rubber mixes from field demonstration projects in Maryland. *Transportation Research Record*, n. 1492, p. 96-107.
- Cordeiro, W. R. (2006) *Comportamento de Concretos Asfálticos Projetados com Cimento Asfáltico Modificado por Borracha de Pneus*. 253p. Dissertação (Mestrado) Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- Cornell J. A. (2002) *Experiments with Mixtures: Design, Models, and the Analysis of Mixture Data* (3rd. ed.). John Wiley & Sons, New York.
- Epps, J. A. (1994) *Uses of recycled rubber tires in highways*. NCHRP – Synthesis of Highway Practice 198, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 162p.
- Faxina, A. L. (2002) *Estudo em laboratório do desempenho de concreto asfáltico usinado a quente empregando ligante do tipo asfalto-borracha*. 274p. Dissertação (mestrado) – EESC, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.
- Faxina, A. L. (2006) *Estudo da viabilidade técnica do uso de resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligante asfalto-borracha*. 308p. Tese (Doutorado) – EESC, Universidade de São Paulo. São Carlos.
- Leite, L. F. M.; Motta, L. M. G.; Bernucci, L. B.; Soares, J.B (2000) Mechanical behavior of asphalt rubber mixes prepared in laboratory. *Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference*. Vilamoura, Portugal, p. 309-318.
- Lemes, P. C. L. (2004) *Estudo do envelhecimento a curto prazo de misturas asfálticas densas com cimentos asfálticos modificados*. 131p. Dissertação (Mestrado) – EESC, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

---

#### **Endereço dos autores:**

**Manoel Henrique Alba Sória, Adalberto Leandro Faxina, Fernanda Pilati, Glauco Túlio Pessa Fabbri e Antonio Carlos Gigante**

Departamento de Transportes, EESC-USP, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13560-970, São Carlos, SP, (16) 3373 9611, fax (16) 3373 9602, , [mane@sc.usp.br](mailto:mane@sc.usp.br), [alfaxina@sc.usp.br](mailto:alfaxina@sc.usp.br), [fepilati@sc.usp.br](mailto:fepilati@sc.usp.br), [glauco@sc.usp.br](mailto:glauco@sc.usp.br), [gigante@sc.usp.br](mailto:gigante@sc.usp.br)

**Leni Figueiredo Mathias Leite**

Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. M. de Mello – Petrobras-PDAB-LPE, Ilha do Fundão, Quadra 7, Cidade Universitária, 21949-598, Rio de Janeiro, RJ, (21) 3865 6736, [leniml@petrobras.com.br](mailto:leniml@petrobras.com.br)