

MODELAGEM ESTATÍSTICA DA RESISTÊNCIA À FADIGA DEVIDA AO TRÁFEGO DE LIGANTES ASFALTO-BORRACHA

Adalberto Leandro Faxina, DSc.

Manoel Henrique Alba Sória, DSc.

Glauco Tulio Pessa Fabbri, DSc.

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 variação nas proporções de borracha moída e de resíduo de óleo de xisto sobre o parâmetro de fadiga $G^*sen\delta$ da especificação Superpave. Oito ligantes asfálticos foram envelhecidos a curto e a longo prazos (RTFOT e PAV) e então submetidos a ensaios em regime oscilatório de cisalhamento, nas temperaturas de 31, 28, 25, 22, 19, 16, 13 e 10°C. Os dados obtidos foram empregados no ajuste de modelos de regressão, com base nos quais foram gerados gráficos de efeitos dos componentes e superfícies de resposta. A borracha e o óleo reduzem o parâmetro $G^*sen\delta$, o que pode contribuir para o aumento da resistência à fadiga. À medida que diminui a temperatura de ensaio, a intensidade dos efeitos da borracha e do óleo sobre $G^*sen\delta$ aumenta e o número de misturas que atendem o limite de 5,0 MPa da especificação Superpave diminui.

ABSTRACT

This work aims at evaluating the effects of the variation in the proportions of crumb rubber and shale-oil residue on the fatigue parameter $G^*sen\delta$ of Superpave specification. Eight asphalt binders were submitted to short- and long-term aging (RTFOT and PAV) and then tests in the oscillatory-shear mode were performed, at 31, 28, 25, 22, 19, 16, 13 e 10°C. Test results were used to fit regression models, based on which response trace plots and contour plots were made. Both crumb rubber and shale-oil residue reduce the parameter $G^*sen\delta$, what may contribute to increase fatigue resistance. As test temperature decreases, the intensity of the effects of rubber and oil on $G^*sen\delta$ increases and the number of mixtures that meet the Superpave limit of 5,0 MPa reduces.

1. INTRODUÇÃO

Nas pesquisas sobre o efeito de modificadores sobre as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos e das misturas asfálticas, um dos principais fatores a se considerar é a proporção do modificador empregado. A técnica estatística de experimentos com misturas (Cornell, 2002) tem se mostrado efetiva na avaliação dos efeitos da variação nas proporções dos modificadores sobre as propriedades de interesse na área de pavimentação (Faxina, 2006), a exemplo de outras aplicações nas áreas farmacêutica, alimentícia, etc. Os principais recursos oferecidos pela técnica de experimentos com misturas são: o delineamento de experimentos visando o ajuste de modelos polinomiais, a análise dos efeitos isolados dos componentes por meio de gráficos de efeitos de componentes, e a análise dos efeitos de interação entre componentes, empregando superfícies de resposta. Em conjunto, estes recursos permitem responder algumas questões básicas relativas ao efeito dos modificadores: (1) o que ocorre com uma dada propriedade ao se aumentar a concentração do modificador?; (2) como a interação entre os componentes da mistura afeta uma dada propriedade?; e (3) quais composições são indicadas, quando se dispõe de valores-alvo ou limites de especificação para uma dada propriedade?

Por se tratar de um material de elevada elasticidade, a borracha moída, obtida da trituração de pneus descartados, tende a aumentar a elasticidade do ligante asfáltico, reduzindo sua rigidez. Na extensão em que ligantes asfálticos de menor rigidez contribuem para o aumento da resistência à fadiga devida ao tráfego, a adição de borracha é uma alternativa tecnicamente atrativa para proporcionar revestimentos de maior durabilidade. No entanto, a seleção de concentrações adequadas de borracha depende da avaliação das propriedades reológicas do

ligante asfalto-borracha em outras temperaturas, ao menos nas temperaturas das atividades de usinagem e de compactação e de ocorrência de deformação permanente. Normalmente, a adição de proporções elevadas de borracha favorece as resistências à deformação permanente e à fadiga, porém prejudica a trabalhabilidade da mistura asfáltica durante a construção.

A adição de óleos extensores é uma forma de contornar o problema de perda de trabalhabilidade, provocado pelo aumento excessivo da viscosidade do ligante asfalto-borracha, mas o óleo incorporado também afeta as propriedades reológicas do material nas temperaturas de ocorrência de deformação permanente e de trincas por fadiga. A seleção de proporções adequadas de borracha moída e óleo extensor se reduz, portanto, a um problema de dosagem. A técnica de experimentos com misturas é a ferramenta indicada para solucionar este problema, quando associada a limites de especificação para as propriedades do ligante asfáltico ou das misturas asfálticas.

O objetivo deste trabalho é avaliar os efeitos da variação nas proporções de borracha moída e do resíduo de óleo de xisto sobre o parâmetro $G^*\sin\delta$ da especificação Superpave para ligantes asfálticos. Oito ligantes asfálticos, compostos com teores diversos de borracha moída e de resíduo de óleo de xisto, foram preparados e submetidos a envelhecimento a curto prazo em estufa RTFO e, em seguida, envelhecidos a longo prazo em estufa PAV. As amostras foram submetidas a ensaio em regime oscilatório de cisalhamento, para determinação do módulo complexo (G^*) e do ângulo de fase (δ), segundo norma ASTM D 7175-05, nas temperaturas de 31, 28, 25, 22, 19, 16, 13 e 10°C. De posse dos dados, modelos polinomiais de terceiro grau, do tipo cúbico especial, foram ajustados e, com base neles, gráficos de efeitos de componentes e superfícies de resposta foram gerados.

2. FADIGA DE LIGANTES ASFÁLTICOS

O dano por fadiga é provavelmente o mecanismo de ruptura relacionado a propriedades reológicas menos compreendido. Isso se deve, em parte, à necessidade de realização de ensaios demorados e difíceis para avaliar a resistência à fadiga dos ligantes asfálticos e das misturas asfálticas. A seleção de um critério para assegurar resistência satisfatória à formação de trincas por fadiga foi o maior desafio enfrentado pelos desenvolvedores da especificação Superpave. Em primeiro lugar, as trincas por fadiga geralmente ocorrem tarde na vida de um pavimento, exigindo ensaios em que o ligante asfáltico seja apropriadamente envelhecido para simular suas propriedades a longo prazo. Outra complicação é que os resultados de ensaios de fadiga dependem do tipo de ensaio realizado. Em ensaios a deformação controlada, ligantes asfálticos de menor consistência são mais resistentes à fadiga. Por outro lado, em ensaios a tensão controlada, ligantes asfálticos de consistência maior são mais resistentes à fadiga. A questão é: qual tipo de ensaio é indicador mais apropriado da fadiga como ela de fato ocorre no pavimento? (Anderson *et al.*, 1991; Christensen e Anderson, 1992; Anderson e Kennedy, 1993)

Os pesquisadores do SHRP consideraram que a fadiga a deformação controlada é o mecanismo crítico para a previsão do desempenho de um ligante asfáltico. Isso está baseado em uma série de observações. Historicamente, o dano por fadiga tem sido associado à rigidez do ligante asfáltico, tanto dos que eram mais consistentes desde o início, quanto daqueles que endureceram por oxidação. Isso indica um mecanismo de deformação controlada no campo. Outra consideração é a situação crítica que existe quando um pavimento, apoiado em um

subleito fraco, está sujeito a um tráfego intenso. O dano por fadiga sob tais condições pode ser bastante severo e seria do tipo deformação controlada, uma vez que as deformações do pavimento seriam controladas pela deformação do subleito (Christensen e Anderson, 1992).

Em ensaios sob deformação controlada, há uma forte tendência de aumentar a resistência à fadiga com a redução da rigidez do ligante asfáltico. Também se pode admitir que grande parte do dano por fadiga ocorre próximo ou abaixo da temperatura média anual do pavimento, com possível dano severo sob temperaturas da ordem de 0°C, se o subleito estiver sujeito a congelamento e degelo. Assim, para avaliar a resistência de um ligante asfáltico ao dano por fadiga com base em uma curva isócrona, os valores de módulo na faixa entre 0 e 25°C deveriam ser considerados. De forma geral, pode-se admitir que módulos menores, nessa faixa de temperatura, estarão associados ao aumento da resistência à fadiga (Christensen e Anderson, 1992).

Com base em investigações anteriores de dados de campo, o conceito de energia dissipada, que está relacionado a $G^*\sin\delta$, foi adotado como o critério de fadiga na especificação Superpave. Resultados das pesquisas do programa SHRP indicaram que a energia dissipada por ciclo de carregamento está relacionada com o comportamento à fadiga de misturas asfálticas. A avaliação do desempenho à fadiga de trechos em seções de rodovia em Zaca-Wigmore e de ensaios de fadiga em laboratório levou à limitação do valor do módulo de dissipação ao máximo de 5,0 MPa, a 10 rad/s (1,59 Hz) na temperatura intermediária do pavimento (Christensen e Anderson, 1992).

3. DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO

Os ligantes asfálticos avaliados foram 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 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 $x_1 + x_2 + x_3 = 1,0$.

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).

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 (tratores, caminhões e ônibus). 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 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.

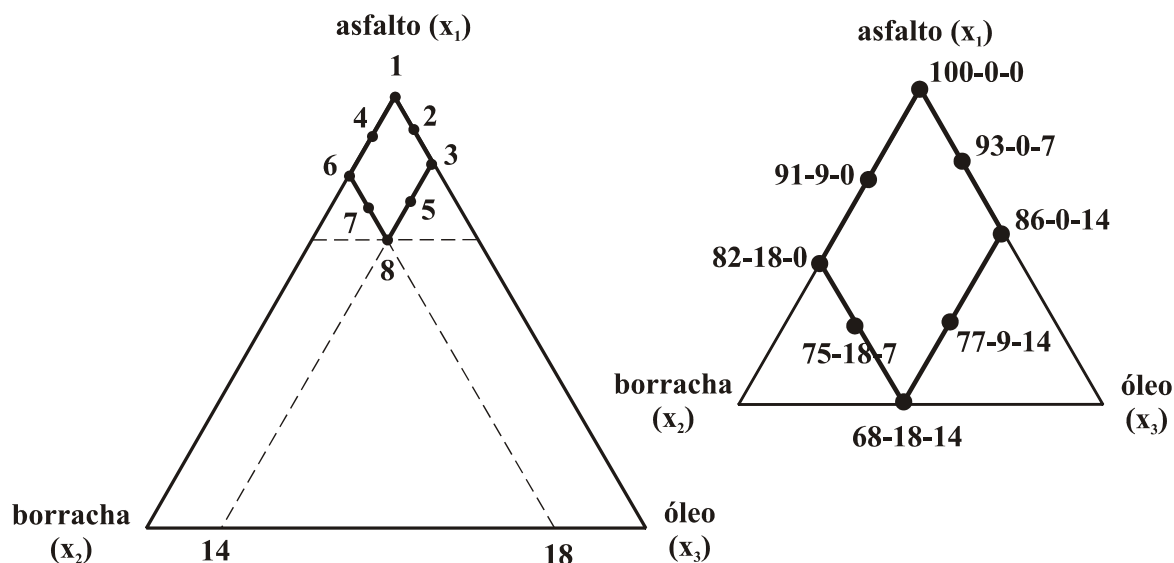


Figura 1: Simplex do experimento, sub-região delimitada e ligantes asfálticos escolhidas

Tabela 1: Composição granulométrica da borracha

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

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A fim de avaliar o efeito da borracha moída e do resíduo de óleo de xisto sobre a resistência à fadiga devida ao tráfego dos ligantes asfálticos selecionados, a rotina de laboratório foi dividida em três etapas: preparação das amostras, envelhecimentos a curto e a longo prazos e realização dos ensaios de fadiga. Foram preparados oito ligantes asfálticos, em conformidade com o delineamento do experimento, que, em seguida, foram submetidos a envelhecimento. As amostras foram, posteriormente, submetidas aos ensaios de cisalhamento em regime oscilatório no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR). De posse das medidas de G^* e δ , nas temperaturas escolhidas, foram obtidos os valores do parâmetro de fadiga devida ao tráfego para ligantes asfálticos da especificação Superpave, $G^*\text{sen}\delta$.

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 7 ligantes asfálticos, aos quais se soma a mistura de referência (CAP 30/45), totalizando 8 ligantes asfálticos.

5.2. Envelhecimentos a curto e a longo prazos

O condicionamento dos ligantes asfálticos a curto prazo foi efetuado por meio do ensaio de

envelhecimento de filme fino rotativo (RTFOT), segundo a norma ASTM D 2872-97. As estufas RTFO utilizadas foram a da marca Despatch modelo RTFOT e a da marca James Cox & Sons modelo CS 325-A. Esse condicionamento se dá pela exposição de uma película fina de ligante asfáltico, com massa total de $35 \pm 0,5$ g, em frasco padronizado, a um jato de ar com vazão de 4.000 ± 200 l/s, por 85 min, a $163 \pm 0,5$ °C. Na sequência, o resíduo dos frascos foi coletado e homogeneizado.

O condicionamento dos ligantes asfálticos a longo prazo foi efetuado por meio do ensaio em vazo pressurizado para envelhecimento (PAV), segundo a norma ASTM D 6521-03a. A estufa PAV empregada foi a da marca Prentex modelo 9300. O envelhecimento a longo prazo é realizado por meio da exposição do resíduo do RTFOT, acondicionado em pratos metálicos preenchidos com $50 \pm 0,5$ g, a uma pressão de $2,1 \pm 0,1$ MPa, sob temperatura de $100 \pm 0,5$ °C, durante o período de $20 \text{ h} \pm 10 \text{ min}$. Em seguida, o resíduo foi coletado e acondicionado em estufa a vácuo, à 170 ± 5 °C e pressão de $15 \pm 2,5$ kPa, durante 30 ± 10 min, para posterior realização dos ensaios.

5.3. Ensaios de fadiga

Os ensaios foram efetuados em oito temperaturas, de 31 a 10°C, com decrementos de 3°C, a 10 rad/s, em regime oscilatório de cisalhamento, empregando reômetro marca TA Instruments modelo CSA-100, que opera em regime de deformação controlada. O procedimento de ensaio é o constante na norma ASTM 7175-05. A mesma amostra foi testada nas oito temperaturas, sendo utilizadas três amostras para cada uma das misturas.

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.

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

com $i, j, k = 1, 2, \dots, q$, sendo q o número de componentes da mistura, β_i , β_{ij} e β_{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 curva no gráfico indica o efeito de mudar o componente correspondente ao longo de uma linha imaginária (direção), conectando a mistura de referência (normalmente o centróide da região) ao vértice da região experimental e a mistura de referência ao lado oposto ao vértice.

É preciso entender 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.

Ao analisar 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 parâmetro ($G^*sen\delta$) a 31, 28, 25, 22, 19, 16, 13 e 10°C e a temperatura de especificação à fadiga devida ao tráfego, correspondente à temperatura em que $G^*sen\delta = 5,0$ MPa. A Figura 2 traz os gráficos de efeitos dos componentes e a Figura 3 mostra as superfícies de resposta para $G^*sen\delta$, para as oito temperaturas de ensaio. A Figura 4 mostra o gráfico de efeitos dos componentes e a superfície de resposta para a temperatura de especificação à fadiga devida ao tráfego. Tanto os gráficos de efeitos dos componentes quanto as superfícies de resposta foram gerados com base nos modelos de regressão apresentados na Tabela 3. As curvas de nível correspondentes a $G^*sen\delta = 5$ MPa são indicadas nas superfícies de resposta.

Tabela 3: Modelos de regressão para $G^*sen\delta$ (MPa)

propriedade	modelo de regressão	R ² (%)	n
$G^*sen\delta$ (MPa) 31°C	$= 4,30x_1 + 12,31x_2 + 35,23x_3 - 31,94x_1x_2 - 60,91x_1x_3$	98,21	25
$G^*sen\delta$ (MPa) 28°C	$= 6,98x_1 + 23,28x_2 + 49,46x_3 - 56,19x_1x_2 - 88,47x_1x_3$	98,40	25
$G^*sen\delta$ (MPa) 25°C	$= 11,0x_1 + 40,5x_2 + 63,3x_3 - 93,1x_1x_2 - 119,4x_1x_3$	98,55	25
$G^*sen\delta$ (MPa) 22°C	$= 16,6x_1 + 61,1x_2 + 71,5x_3 - 139,7x_1x_2 - 146,2x_1x_3$	98,75	25
$G^*sen\delta$ (MPa) 19°C	$= 24,0x_1 + 82,7x_2 + 66,7x_3 - 193,0x_1x_2 - 158,3x_1x_3$	98,95	24
$G^*sen\delta$ (MPa) 16°C	$= 32,9x_1 + 101,6x_2 + 35,7x_3 - 245,2x_1x_2 - 135,1x_1x_3$	98,97	24
$G^*sen\delta$ (MPa) 13°C	$= 43,5x_1 + 148,6x_2 - 85,7x_3 - 329,6x_1x_2$	98,81	24
$G^*sen\delta$ (MPa) 10°C	$= 54,4x_1 + 73,8x_2 - 82,6x_3 - 262,8x_1x_2$	98,99	24
T_{espec} fadiga (°C)	$= 29,9x_1 - 127,2x_2 - 11,8x_3 + 129,8x_1x_2$	98,85	24

x_1 : proporção de CAP; x_2 : proporção de borracha; x_3 : proporção de óleo

Os gráficos de efeitos dos componentes indicam que os efeitos da borracha e do óleo sobre o parâmetro de fadiga da especificação Superpave são concorrentes, atuando no sentido de reduzir o valor do parâmetro, o que pode contribuir para o aumento da resistência à fadiga devida ao tráfego. Embora sejam materiais de natureza distinta, borracha e óleo atuam na mesma direção sobre $G^*sen\delta$ nesta faixa de temperatura. A Tabela 4 apresenta a variação média de $G^*sen\delta$ provocada pelo aumento de 1% na proporção de borracha e de óleo, em suas respectivas faixas de variação, em função das temperaturas de ensaio. O sinal negativo indica redução de $G^*sen\delta$.

Tabela 4: Variação média de $G^*sen\delta$ para 1% de aumento nas proporções de borracha e óleo com a temperatura de ensaio

temperatura de ensaio (°C)	efeito da borracha (MPa)	efeito do óleo (MPa)
31	-0,11	-0,12
28	-0,18	-0,19
25	-0,30	-0,28
22	-0,47	-0,40
19	-0,70	-0,54
16	-1,00	-0,68
13	-1,36	-0,84
10	-1,69	-0,98

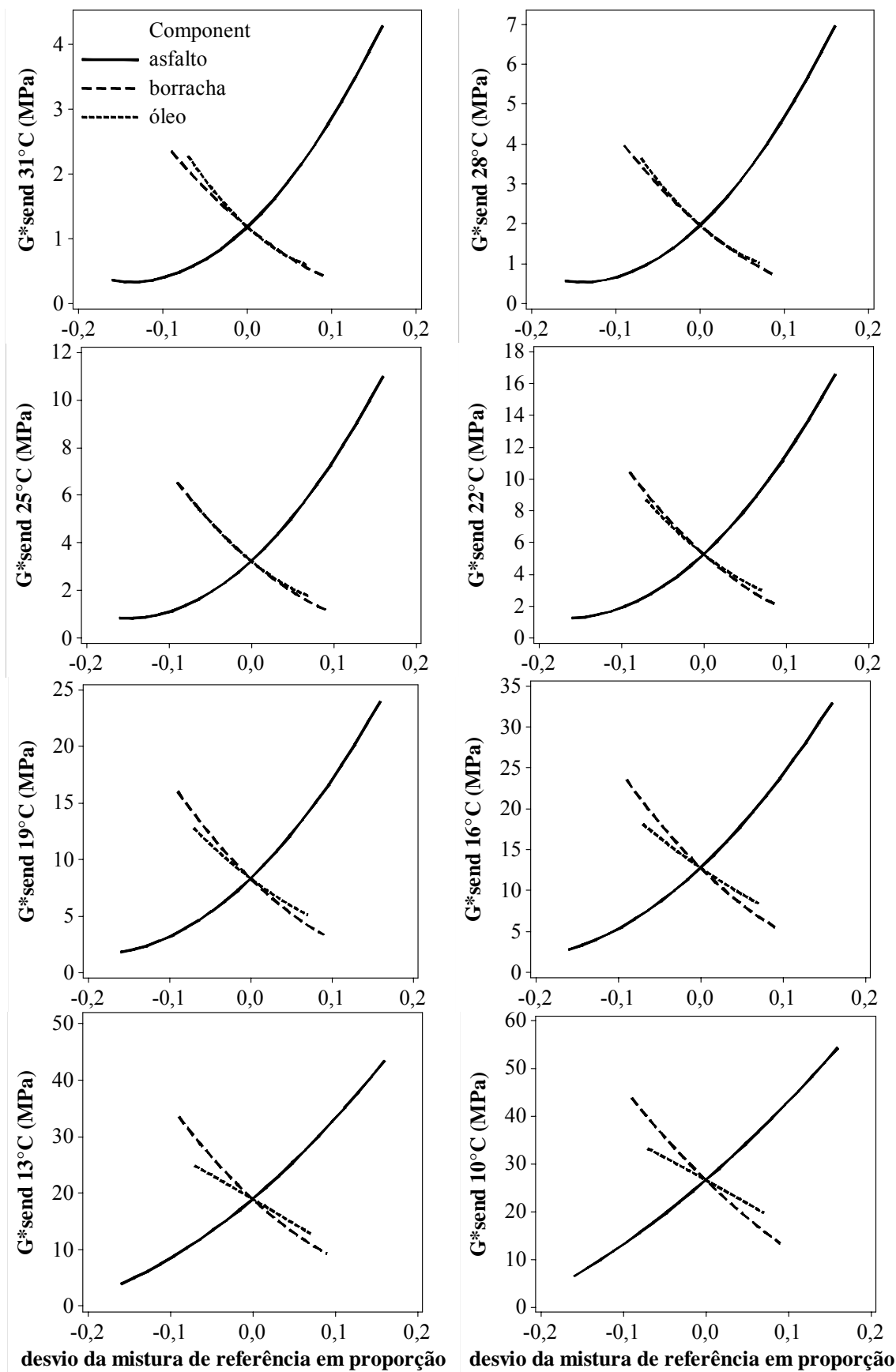


Figura 2: Efeitos dos componentes sobre G^*_{send} , a 31, 28, 25, 22, 19, 16, 13 e 10°C

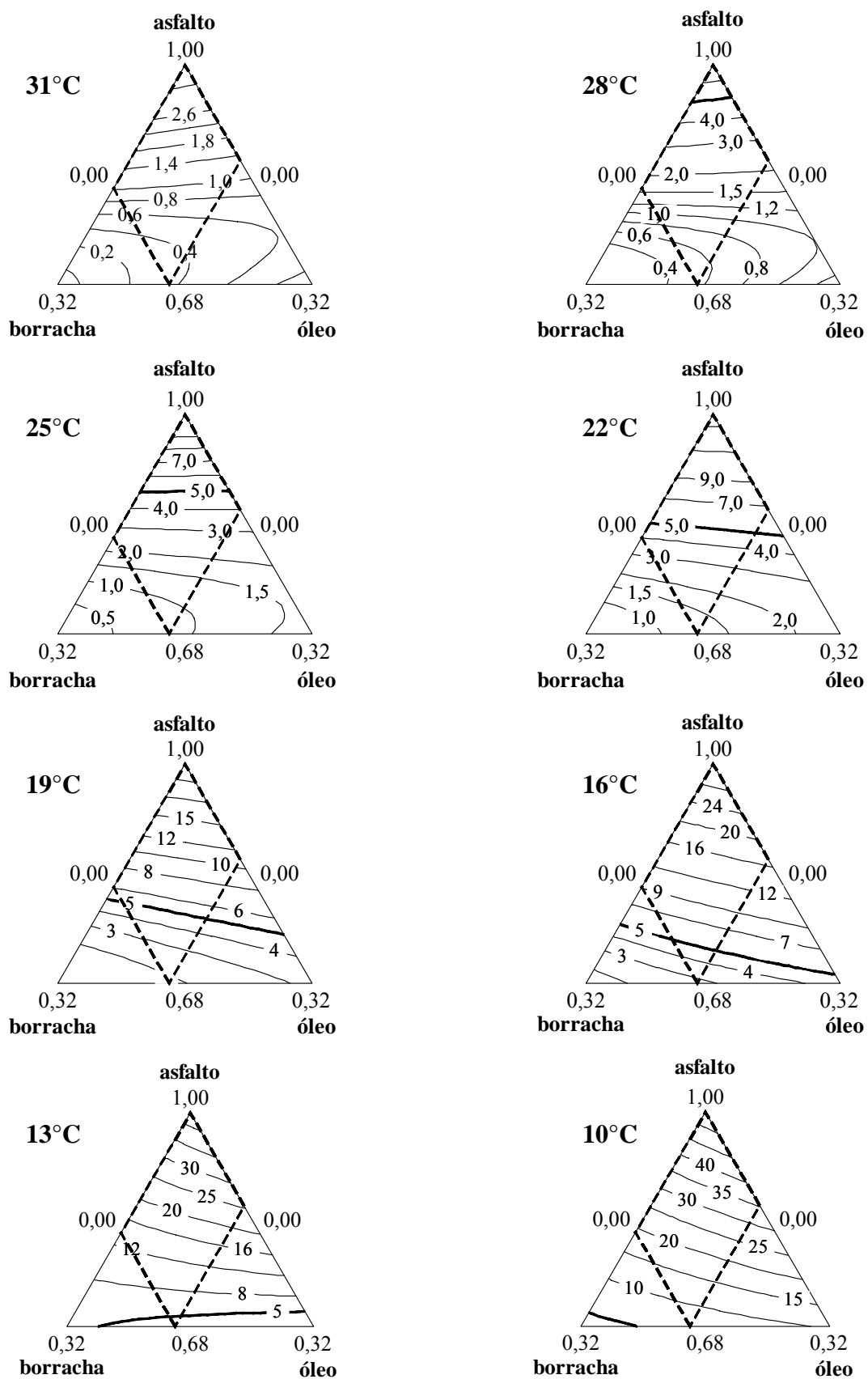


Figura 3: Superfícies de resposta para $G^*\text{sen}\delta$, a 31, 28, 25, 22, 19, 16, 13 e 10°C

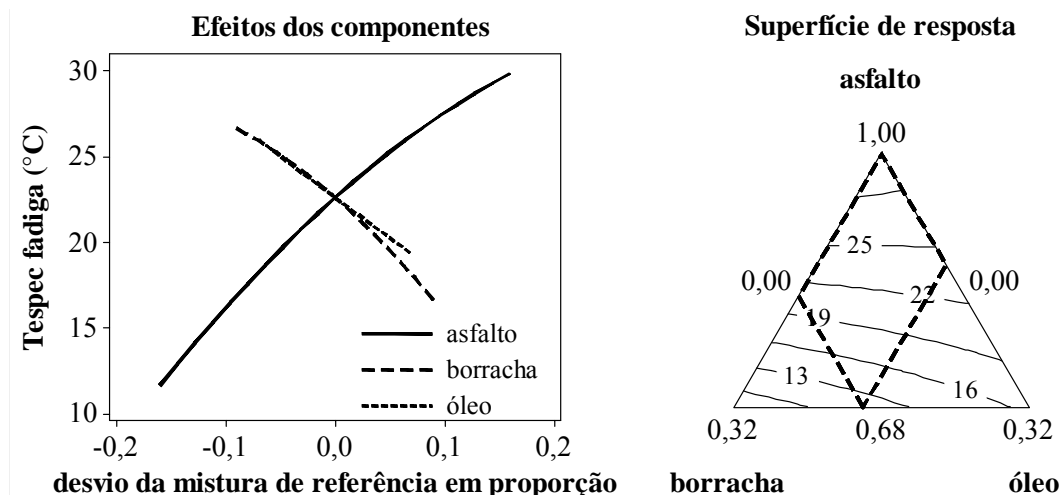


Figura 4: Efeitos dos componentes sobre a temperatura de especificação à fadiga devida ao tráfego e superfície de resposta

A temperatura de ensaio não afeta a tendência geral do efeito da borrracha e do óleo sobre o parâmetro $G^*_{sen\delta}$, porém interfere sobre a intensidade destes efeitos. A intensidade dos efeitos da borrracha e do óleo em reduzir o parâmetro de fadiga aumenta à medida que diminui a temperatura de ensaio. Nas temperaturas de ensaio mais altas, as intensidades são similares, mas, a partir de 19°C, a borrracha passa a ter um efeito mais intenso na redução de $G^*_{sen\delta}$. Aparentemente, a temperatura destaca o efeito positivo da borrracha sobre a resistência à fadiga devida ao tráfego. A borrracha tem natureza predominantemente elástica, ao contrário do óleo, que tem natureza predominantemente viscosa, o que a torna menos sensível à redução da temperatura que o óleo.

As superfícies de resposta indicam que a temperatura de ensaio também afeta a interação entre os componentes. De forma geral, misturas compostas com concentrações baixas de borrracha e de óleo (parte superior da região experimental) fornecem valores mais altos do parâmetro $G^*_{sen\delta}$. Valores mais baixos deste parâmetro são obtidos quando são compostas misturas com proporções altas de borrracha e de óleo (porção inferior da região experimental).

A norma ASTM D 6373-99 e o projeto de norma ASTM para o ligante asfalto-borrracha especificam o limite máximo de 5,0MPa para o parâmetro de fadiga da especificação Superpave. Tomando por base este limite, observa-se que a 31°C, todas as misturas de dentro da região experimental atendem este requisito, indicando que qualquer composição é adequada em termos de resistência à fadiga devida ao tráfego nesta temperatura. No entanto, a partir de 28°C, algumas misturas passam a não atender o requisito de norma. A 28°C, as misturas caracterizadas por teores baixos de borrracha e de óleo não são adequadas, à luz deste requisito.

À medida que a temperatura de ensaio diminui, a região de misturas não-recomendáveis aumenta. Na temperatura de 22°C, por exemplo, apenas misturas contendo proporções altas de borrracha (superiores a 16%) são admissíveis, podendo empregar quaisquer teores de óleo. Nas temperaturas mais baixas, apenas as misturas contendo teores altos de borrracha e de óleo se enquadram no requisito de fadiga devida ao tráfego. Na temperatura de 13°C, poucas misturas são adequadas e, na temperatura de 10°C, nenhuma mistura atende este requisito.

Nas condições brasileiras, em que a fadiga dos pavimentos ocorre em temperaturas mais altas, a maioria das composições é adequada, a não ser aquelas com concentrações baixas de borracha e de óleo. Por terem efeito sinérgico, borracha e óleo contribuem significativamente para o aumento da resistência à fadiga nos países de clima temperado e frio, fazendo com que a ruptura por fadiga se dê a temperaturas mais baixas.

A temperatura de especificação à fadiga devida ao tráfego corresponde à temperatura em que $G^*_{sen\delta} = 5 \text{ MPa}$, ou seja, quando o ligante asfáltico romperia por fadiga. A Figura 4 indica que a borracha e o óleo contribuem para a redução da temperatura de ocorrência de fadiga do ligante asfáltico com intensidades semelhantes: a borracha com taxa de $0,55^\circ\text{C}$ para cada 1% de borracha adicionado e o óleo com taxa de $0,48^\circ\text{C}$ para cada 1% de óleo adicionado. A superfície de resposta mostra que temperaturas de ruptura por fadiga mais elevadas são obtidas para misturas contendo proporções baixas de borracha e óleo e que temperaturas mais baixas são obtidas para misturas com proporções mais altas de borracha e de óleo.

9. CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo avaliar os efeitos das variações nas proporções de borracha moída e de resíduo de óleo de xisto sobre o parâmetro $G^*_{sen\delta}$ de fadiga devida ao tráfego da especificação Superpave. Foram compostos oito ligantes asfálticos, com proporções diferentes de borracha moída e de resíduo de óleo de xisto, que, em seguida, foram submetidos aos envelhecimentos a curto e a longo prazos (RTFOT e PAV). As amostras foram submetidas a ensaios em regime oscilatório de cisalhamento e os dados obtidos foram empregados no ajuste de modelos de regressão do tipo cúbico especial, com base nos quais foram gerados gráficos de efeitos dos componentes e superfícies de resposta.

A análise de efeitos dos componentes indicou que os efeitos da borracha e do óleo sobre o parâmetro de fadiga atuam no sentido de reduzir o valor do parâmetro, o que pode contribuir para o aumento da resistência à fadiga devida ao tráfego. A temperatura de ensaio não afeta a tendência geral dos efeitos dos dois modificadores sobre o parâmetro $G^*_{sen\delta}$, porém interfere sobre a intensidade deles. A intensidade dos efeitos da borracha e do óleo em reduzir o parâmetro de fadiga aumenta à medida que diminui a temperatura de ensaio. Nas temperaturas mais altas, entre 22 e 31°C , as intensidades dos efeitos dos dois componentes são similares. Já a partir de 19°C , até 10°C , a borracha passa a ter um efeito mais intenso na redução do parâmetro de fadiga. A borracha, cuja natureza é predominantemente elástica, é menos sensível à redução da temperatura que o óleo, que tem natureza predominantemente viscosa. A borracha e o óleo também contribuem para a redução da temperatura de ocorrência de fadiga do ligante asfáltico, apresentando intensidades semelhantes.

Tomando por base o limite de $G^*_{sen\delta}$ especificado pelas normas ASTM D 6373-99 e o projeto de norma ASTM para ligantes asfalto-borracha, todas as misturas de dentro da região experimental atendem este requisito a 31°C . A 28°C , as misturas caracterizadas por teores baixos de borracha e de óleo não são adequadas. À medida que a temperatura de ensaio diminui, a região de misturas não-recomendáveis aumenta. Na temperatura de 22°C , apenas misturas contendo proporções altas de borracha (superiores a 16%) são admissíveis, podendo empregar quaisquer teores de óleo. Nas temperaturas mais baixas, apenas as misturas contendo teores altos de borracha e de óleo se enquadram no requisito de fadiga. Na temperatura de 13°C , poucas misturas são adequadas e, na temperatura de 10°C , nenhuma mistura atende este requisito. Temperaturas de ruptura por fadiga mais elevadas são obtidas para misturas contendo

proporções baixas de borracha e de óleo e temperaturas mais baixas são obtidas para misturas com proporções mais altas de borracha e 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, e à FAPESP pela concessão de bolsa de doutorado ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, D. A. e T. W. Kennedy (1993) Development of SHRP Binder Specification. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v.62, p.481-507.
- Anderson, D.A.; D. W. Christensen e H. U. Bahia (1991). Physical Properties of Asphalt Cement and the Development of Performance-related Specifications. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v.60, p.437-456.
- Christensen, J. R. e D. A. Anderson (1992) Interpretation of Dynamic Mechanical Test Data for Paving Grade Asphalt Cements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v.61, p.67-116.
- Cornell J. A. (2002) *Experiments with Mixtures: Design, Models, and the Analysis of Mixture Data* (3rd. ed.). John Wiley & Sons, New York.
- 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.

Endereço dos autores:

Adalberto Leandro Faxina, Manoel Henrique Alba Sória e Glauco Tulio Pessa Fabbri

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