

PROPRIEDADES VISCOELÁSTICAS DE ASFALTOS MODIFICADOS COM BORRACHA DE PNEU E ÓLEO DE XISTO

Adalberto Leandro Faxina, MSc.

Manoel Henrique Alba Sória, DSc.

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

Leni Figueiredo Mathias Leite, DSc.

Centro de Pesquisas Leopoldo Miguez de Mello (Cenpes), Petrobras

Rosário Elida Salum Bretas, DSc.

Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos

RESUMO

O monitoramento de propriedades viscoelásticas fundamentais ganhou impulso com as especificações Superpave e tem se mostrado eficiente na caracterização de ligantes quanto ao desempenho em pavimentação. Nesse estudo, são avaliadas as propriedades viscoelásticas de 27 asfaltos modificados com borracha de pneus e resíduo de óleo de xisto, a 64°C, temperatura representativa da faixa em que ocorrem deformações permanentes significativas nas misturas usinadas a quente. Foram obtidas medidas de módulo complexo, de ângulo de fase e de viscosidade complexa e determinados os valores do parâmetro de controle de deformação permanente da especificação Superpave ($G^*/\text{sen}\delta$). Os resultados apontam que os efeitos da borracha e do óleo são antagonísticos. A borracha tende a aumentar G^* , η^* e $G^*/\text{sen}\delta$ e a diminuir δ . O resíduo de óleo de xisto tende a reduzir G^* , η^* e $G^*/\text{sen}\delta$ e a aumentar δ . As superfícies de resposta indicam composições que atendem ao requisito de deformação permanente.

ABSTRACT

The measurement of fundamental viscoelastic properties became increasingly relevant after Superpave specifications and it has been shown to be efficient to characterize binders related to road performance. In this study, viscoelastic properties of 27 rubber-oil modified asphalts are evaluated, at 64°C, a typical temperature condition in which relevant rutting occurs in HMA mixes. Measurements of complex modulus, phase angle, and complex viscosity were performed and values of Superpave rutting parameter ($G^*/\text{sen}\delta$) were calculated. Results indicate that the effects of crumb rubber and shale oil are antagonistic. Rubber tends to increase G^* , η^* and $G^*/\text{sen}\delta$ values and tends to reduce δ values. Shale-oil residue tends to reduce G^* , η^* and $G^*/\text{sen}\delta$ values and tends to increase δ values. Response surfaces indicate ideal proportions of asphalt, rubber and shale-oil residue to meet the Superpave rutting parameter.

1. INTRODUÇÃO

A incorporação de borracha moída de pneus ao asfalto tem proporcionado produtos com maior rigidez e maior elasticidade. Isso se reflete em aumento da parcela da resistência à deformação permanente que cabe ao ligante nas misturas asfálticas. São obtidos produtos com melhor desempenho nas temperaturas em que ocorre deformação permanente no pavimento, normalmente sob pena da perda de trabalhabilidade no instante da construção. A incorporação de óleos aromáticos ao asfalto-borracha, denominados óleos extensores, é uma alternativa prática para a redução da viscosidade durante as operações de usinagem e de compactação das misturas asfálticas, melhorando sua trabalhabilidade. No entanto, esses óleos diminuem a consistência do asfalto à temperatura ambiente, podendo comprometer seu desempenho na pista. Embora sejam materiais leves, pequenas parcelas se volatilizam durante a construção ou ao longo da vida útil da camada asfáltica. A escolha de teores adequados de óleo extensor é crucial na obtenção de asfaltos-borracha de qualidade satisfatória.

O objetivo desse trabalho é monitorar as propriedades viscoelásticas de ligantes asfalto-borracha, modificados com resíduo de óleo de xisto, a uma temperatura considerada representativa de ocorrência de deformação permanente significativa, em pavimentos no Brasil. Foram obtidas medidas de módulo complexo (G^*), ângulo de fase (δ) e viscosidade complexa (η^*) e calculados os valores do parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ para controle da deformação

permanente. Por meio de análise estatística, foram avaliados os efeitos da borracha e do óleo e indicadas composições adequadas desses modificadores.

2. PROPRIEDADES VISCOELÁSTICAS FUNDAMENTAIS

Nas faixas de temperatura em que os pavimentos estão submetidos aos fenômenos de deformação permanente (temperaturas altas) e de fadiga por ação do tráfego (temperaturas intermediárias), os asfaltos apresentam comportamento viscoelástico e, por isso, são mais apropriadamente caracterizados por meio de ensaios dinâmicos em regime oscilatório de cisalhamento (Anderson *et al.*, 1994, Bahia e Anderson, 1995). A peculiaridade de um material viscoelástico é a sua suscetibilidade a dois fatores: o tempo em que é submetido a carregamento e a temperatura. Para qualquer combinação de tempo de aplicação de carga e de temperatura, o comportamento viscoelástico, dentro da faixa de viscoelasticidade linear, deve ser caracterizado por pelo menos duas propriedades: a resistência total à deformação e a distribuição relativa dessa resistência entre uma porção elástica e outra viscoelástica.

O módulo complexo, G^* , representa a resistência total à deformação e o ângulo de fase, δ , representa a distribuição relativa dessa resistência entre um componente em fase e outro defasado. O componente em fase da resistência (G') pode ser diretamente relacionado à energia armazenada em uma amostra a cada ciclo de carregamento. O componente defasado (G'') pode ser diretamente relacionado à energia dissipada a cada ciclo de carregamento. A distribuição relativa desses componentes é função da composição do material, do tempo de carregamento e da temperatura (Bahia e Anderson, 1995).

A determinação dos parâmetros G^* e δ é feita por meio de reômetros, em regime oscilatório de cisalhamento, a tensão controlada ou a deformação controlada. A amostra é condicionada entre duas placas paralelas, das quais uma se mantém fixa e outra gira. A amostra é submetida a ciclos alternados de tensão senoidal, tendo como resposta a tensão defasada de δ em relação à deformação aplicada, como indicado esquematicamente na Figura 1 (Anderson *et al.*, 1991). A resposta mecânica do material é monitorada em função da frequência. O módulo complexo é calculado como a relação entre a tensão de cisalhamento e a deformação do material. Nas temperaturas intermediárias, o asfalto apresenta um comportamento intermediário ao perfeitamente elástico e o perfeitamente viscoso. Dependendo da temperatura e da frequência, o pico de tensão ou deformação pode estar em qualquer ponto entre 0 e 90°, atrasado em relação à solicitação aplicada.

3. DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO

Os ligantes avaliados foram selecionados com base em um experimento delineado por meio da técnica estatística de “experimentos com misturas” (Cornell, 1994), com restrições nas proporções dos componentes e com variáveis de processo. Chamando x_1 o teor de asfalto, x_2 o teor de borracha e x_3 o teor de resíduo de óleo de xisto, as restrições impostas, em porcentagem, foram: $0 \leq x_1 \leq 100$, $0 \leq x_2 \leq 22$ e $0 \leq x_3 \leq 18$. A Figura 2.a ilustra o simplex e a região delimitada para o experimento, onde estão indicadas as misturas projetadas. As variáveis de processo incluídas foram a temperatura e o tempo, nos níveis máximo e mínimo, arbitrados em 170 e 200°C e 90 e 120 min, respectivamente. A energia de cisalhamento foi fixada em 4.000 rpm, para fracionar o experimento. As variáveis de processo foram aplicadas apenas às misturas que contêm borracha (Figura 2.b). As misturas projetadas foram: 100-0-0, 91-0-9, 82-0-18, 89-11-0, 60-22-18, 69-22-9, 71-11-18, 78-22-0 e 80-11-9, onde o primeiro número corresponde ao teor de asfalto, o segundo ao teor de borracha e o terceiro ao teor de óleo.

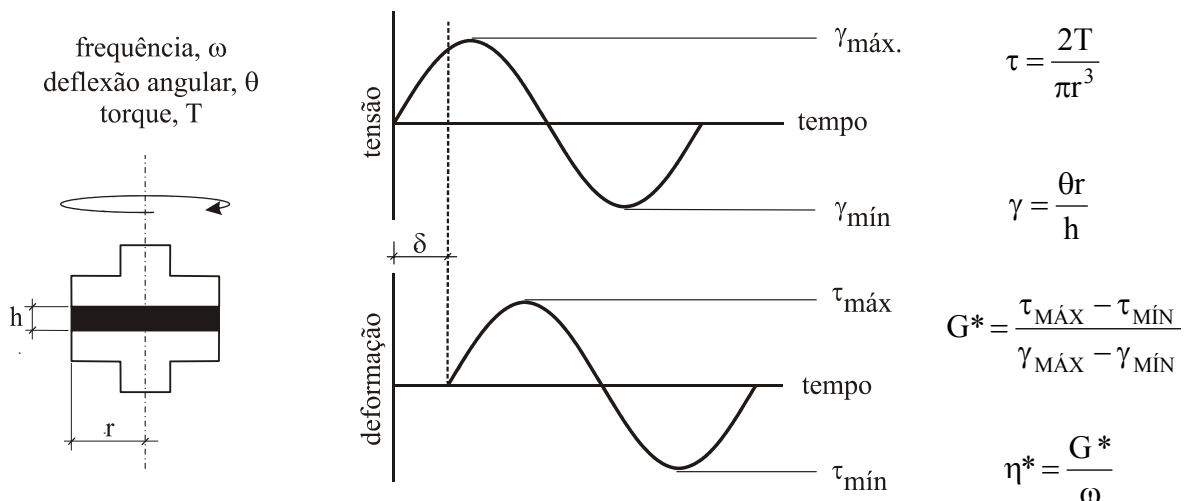


Figura 1: Parâmetros da caracterização viscoelástica. [Adaptado de Anderson *et al.*, 1991]

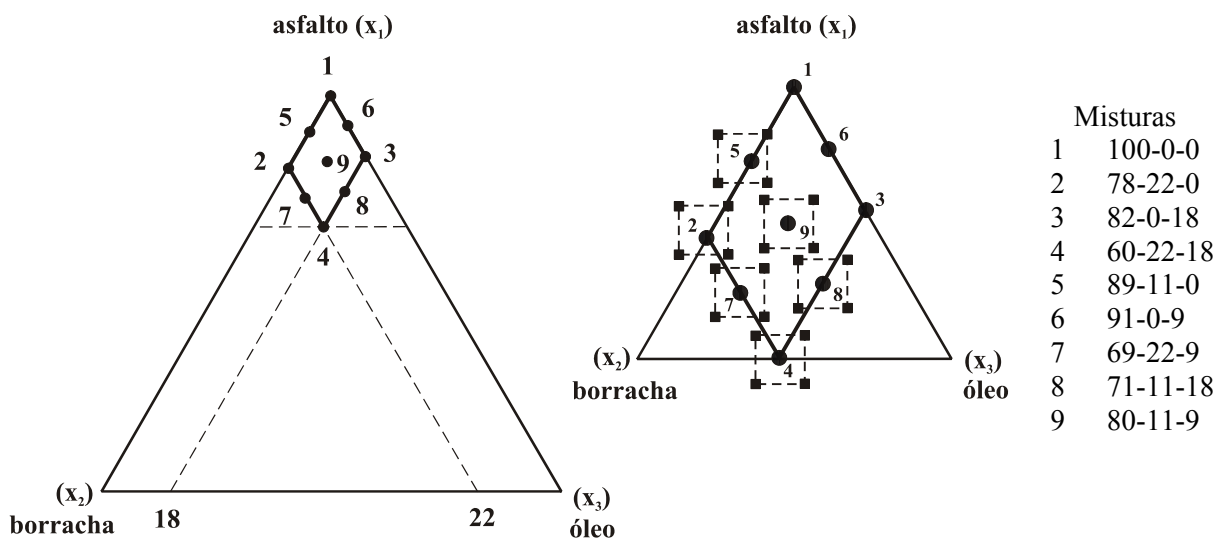


Figura 2: (a) Simplex do experimento, região delimitada e misturas escolhidas e (b) detalhe da região experimental, com as misturas escolhidas e as variáveis de processo

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 material orgânico, 31,4% de negro de fumo e 4,3% de material inorgânico na composição química da borracha. O asfalto de base (CAP 40) foi fornecido pela Refinaria Duque de Caxias (Reduc-Petrobras), de Duque de Caxias, RJ, sendo classificado como CAP 30/45, pela especificação brasileira, e PG 70-10, pela especificação Superpave. 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.

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

5.1. Confeção das misturas

As misturas contendo apenas asfalto e borracha e aquelas contendo asfalto, borracha e óleo de xisto foram preparadas em misturador de alto cisalhamento (marca Silverson, modelo L4RT) sob rotação fixa de 4.000 rpm, nas temperaturas e tempos de mistura especificados no delineamento do experimento. As misturas contendo apenas asfalto e óleo de xisto foram preparadas em misturador de baixo cisalhamento (marca Ika Labortechnik, modelo RW20) sob rotação de 300 rpm, temperatura de 135°C e tempo de 20 min. Foram compostas, no total, 26 misturas, às quais se soma a mistura de referência, totalizando 27 ligantes.

5.2. Ensaios de caracterização física

Os ensaios de caracterização foram efetuados à temperatura de 64°C, a 10 rad/s, em regime oscilatório de cisalhamento, empregando reômetro marca Rheometrics modelo SR-200. Dentre as medidas fornecidas pelo equipamento, foram empregadas na presente análise os valores de G^* , δ e η^* . O procedimento de ensaio é o constante na norma AASHTO TP5/02. Apenas algumas amostras foram submetidas à varredura de tensão para delimitação da faixa de viscoelasticidade linear, pois verificou-se que os limites de tensão obtidos eram razoavelmente superiores ao nível de tensão empregado para todas as amostras (120 Pa). Foi empregada distância entre placas de 1,70 mm, em conformidade com a prescrição de norma referente ao tamanho da partícula de material granular presente no asfalto. A fim de avaliar o efeito do aumento da distância entre placas, algumas amostras foram ensaiadas com distância entre placas de 1,00 e 1,70 mm. Constatou-se que a diferença resultante da variação na distância entre placas não é superior à própria variabilidade dos resultados.

6. RESULTADOS OBTIDOS

Na Figura 3 estão indicadas as médias de duas determinações do módulo complexo, do ângulo de fase, da viscosidade complexa e do parâmetro $G^*/\sin\delta$, medidos na temperatura de 64°C, na frequência de 10 rad/s e na tensão de 120 Pa. [Nomenclatura: teor de asfalto-teor de borracha-teor de óleo/temperatura-tempo]

7. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE

Para a realização da modelagem estatística, foi empregado o pacote estatístico Minitab, versão 14.1. Os testes de significância dos coeficientes foram realizados no nível de significância de 5%. A análise dos resíduos foi realizada, a fim de verificar a adequabilidade dos modelos. O efeito da multicolinearidade, normalmente presente em regiões experimentais altamente delimitadas, não foi considerado nesse caso, uma vez que a modelagem está direcionada exclusivamente para previsão. Mesmo assim, recorreu-se à modelagem em pseudocomponentes, a fim de reduzir o efeito da multicolinearidade. Os modelos empregados na regressão são específicos para modelagem de problemas de misturas (modelos canônicos, com o formato geral indicado na equação 1). O planejamento experimental foi realizado de forma a se ajustar um modelo polinomial de terceiro grau aos dados (modelo cúbico especial).

$$\eta = \sum_{i=1}^q \beta_i^0 x_i + \sum_{i < j} \sum_{j=1}^q \beta_{ij}^0 x_i x_j + \beta_{ijk}^0 x_i x_j x_k + \left(\sum_{i=1}^q \beta_i^m x_i + \sum_{i < j} \sum_{j=1}^q \beta_{ij}^m x_i x_j + \beta_{ijk}^m x_i x_j x_k \right) z_m + \left(\sum_{i=1}^q \beta_i^{12} x_i + \sum_{i < j} \sum_{j=1}^q \beta_{ij}^{12} x_i x_j + \beta_{ijk}^{12} x_i x_j x_k \right) z_1 z_2 \quad (1)$$

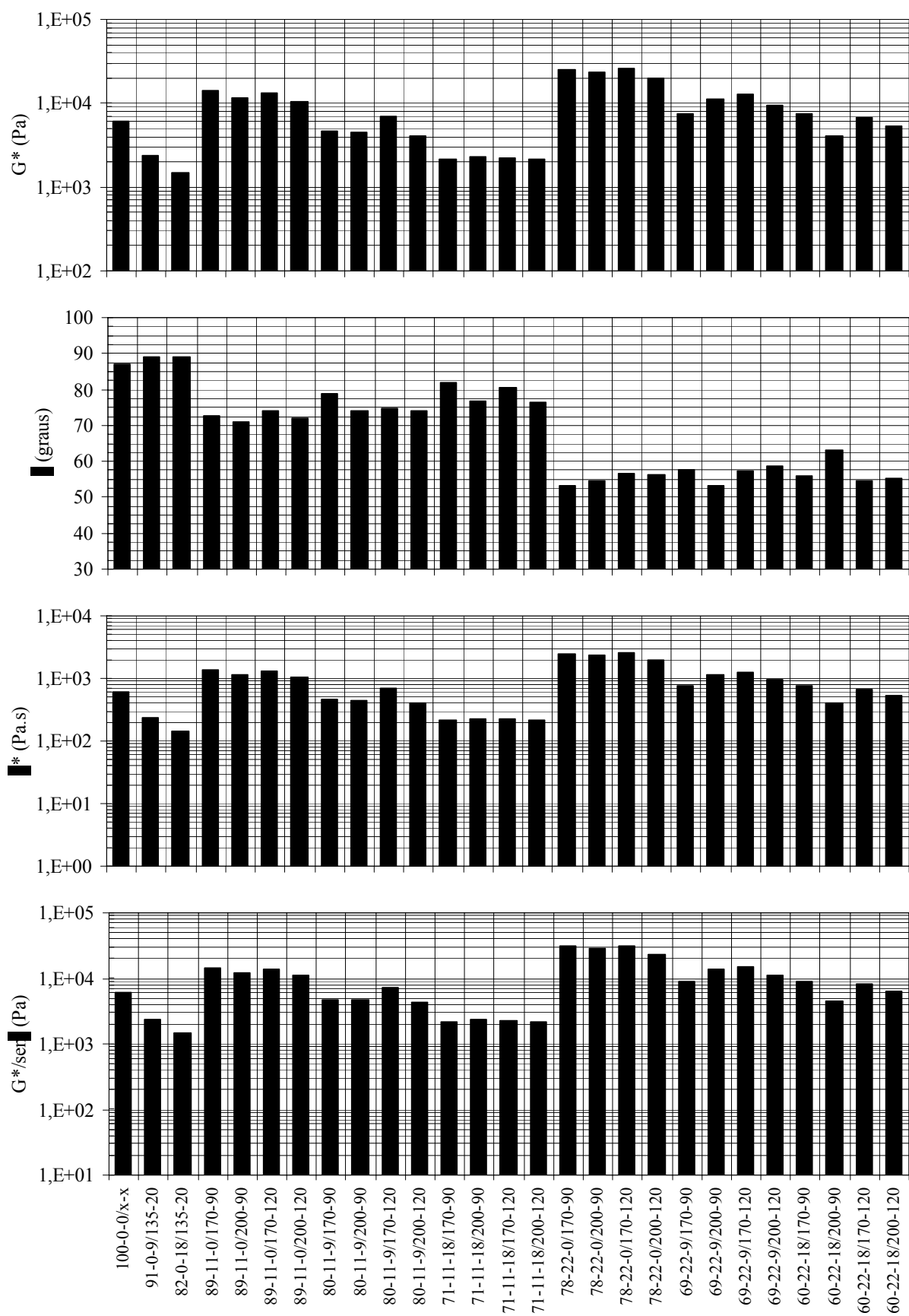


Figura 3: Resultados de G^* , δ , η^* e $G^*/\sin \delta$ a 64°C, 120 Pa, 10 rad/s

com $i, j, k = 1, 2, \dots, q$, sendo q o número de componentes da mistura, e $m = 1, 2$, sendo m o número de variáveis de processo, 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 asfalto, de borracha e de óleo, respectivamente, z_m o valor codificado da variável de processo m e z_1 e z_2 os valores codificados (-1 para o nível inferior e +1 para o nível superior) das variáveis de processo temperatura e tempo de processamento, respectivamente.

Cumprе ressaltar que os modelos apresentados são limitados ao tipo de asfalto, de borracha e de resíduo de óleo de xisto empregados, aos níveis arbitrados para as variáveis de processo e às condições experimentais adotadas para esse estudo, não podendo ser generalizados para qualquer tipo de asfalto, de borracha e de resíduo de óleo de xisto ou de variáveis de processo fora das faixas adotadas nesse estudo.

8. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A Tabela 2 indica os modelos ajustados e as estatísticas correspondentes para as propriedades avaliadas. Nas Figuras 4, 5, 6 e 7 são apresentadas as análises dos efeitos dos componentes, com base nos modelos ajustados, para o nível (0,0) das variáveis de processo, isto é, 185°C e 105 min. As Figuras 8, 9, 10 e 11 mostram as superfícies de resposta, com base nos modelos ajustados, no nível (0,0) das variáveis de processo.

Tabela 2: Modelos ajustados e estatísticas correspondentes

propriedade	modelo ajustado	eq.	R^2	R^2_A	R^2_P	s
G^* 64°C (Pa)	$Y = 6080x'_1 + 43576x'_2 + 22210x'_3 - 16329x'_1x'_2 - 45569x'_1x'_3 - 113973x'_2x'_3 - 26692x'_1x'_2x'_3 - 7193x'_1x'_2T - 4228x'_2x'_3T + 32733x'_1x'_2x'_3T - 2041x'_1x'_2t + 20539x'_1x'_2x'_3t - 7312x'_2Tt + 10393x'_1x'_2Tt + 18219x'_2x'_3Tt - 37876x'_1x'_2x'_3Tt$	2	98,60	98,22	97,5	896,4
δ 64°C (graus)	$Y = 87,48x'_1 + 18,50x'_2 + 104,43x'_3 + 21,19x'_1x'_3 - 20,08x'_1x'_3 + 86,50x'_1x'_2x'_3 + 3,56x'_2T - 7,35x'_1x'_2T - 63,97x'_1x'_2x'_3T + 7,85x'_3t - 10,74x'_1x'_2t - 25,53x'_2x'_3t + 30,22x'_1x'_2x'_3t - 3,41x'_3Tt + 5,29x'_1x'_3Tt + 45,62x'_1x'_2x'_3Tt$	3	99,47	99,33	99,1	1,107
η^* 64°C (Pa.s)	$Y = 608x'_1 + 4358x'_2 + 2221x'_3 - 1633x'_1x'_2 - 4557x'_1x'_3 - 11397x'_2x'_3 - 2669x'_1x'_2x'_3 - 719x'_1x'_2T - 423x'_2x'_3T + 3273x'_1x'_2x'_3T - 204x'_1x'_2t + 2054x'_1x'_2x'_3t - 731x'_2Tt + 1039x'_1x'_2Tt + 1822x'_2x'_3Tt - 3788x'_1x'_2x'_3Tt$	4	98,60	98,22	97,5	89,6
$G^*/\sin\delta$ 64°C (Pa)	$Y = 6267x'_1 + 61258x'_2 + 31346x'_3 - 37084x'_1x'_2 - 61200x'_1x'_3 - 166185x'_2x'_3 - 8410x'_1x'_2T - 5567x'_2x'_3T + 43314x'_1x'_2x'_3T - 9174x'_2Tt + 13711x'_1x'_2Tt + 22896x'_2x'_3Tt - 49389x'_1x'_2x'_3Tt$	5	97,67	97,19	96,3	1380

onde $x'_1 = \frac{x_1 - 0,60}{0,40}$, $x'_2 = \frac{x_2}{0,40}$ e $x'_3 = \frac{x_3}{0,40}$, com x_1 = teor de asfalto, x_2 = teor de borracha, x_3 = teor de óleo,

em porcentagem; T = temperatura de processamento e t = tempo de processamento, codificadas; R^2 , o coeficiente de determinação; R^2_A o R^2 ajustado; R^2_P o R^2 para previsão.

9. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os gráficos de efeitos dos componentes indicam o efeito da variação de um dado componente, mantendo constante a relação entre proporções dos demais. A mistura de referência é a de número 9 (80-11-9). A amplitude horizontal indica a faixa de variação da proporção dos componentes e a amplitude vertical indica a intensidade do efeito sobre a propriedade. A

porcentagem de cada componente aumenta da direita para a esquerda, dentro da sua respectiva faixa de variação.

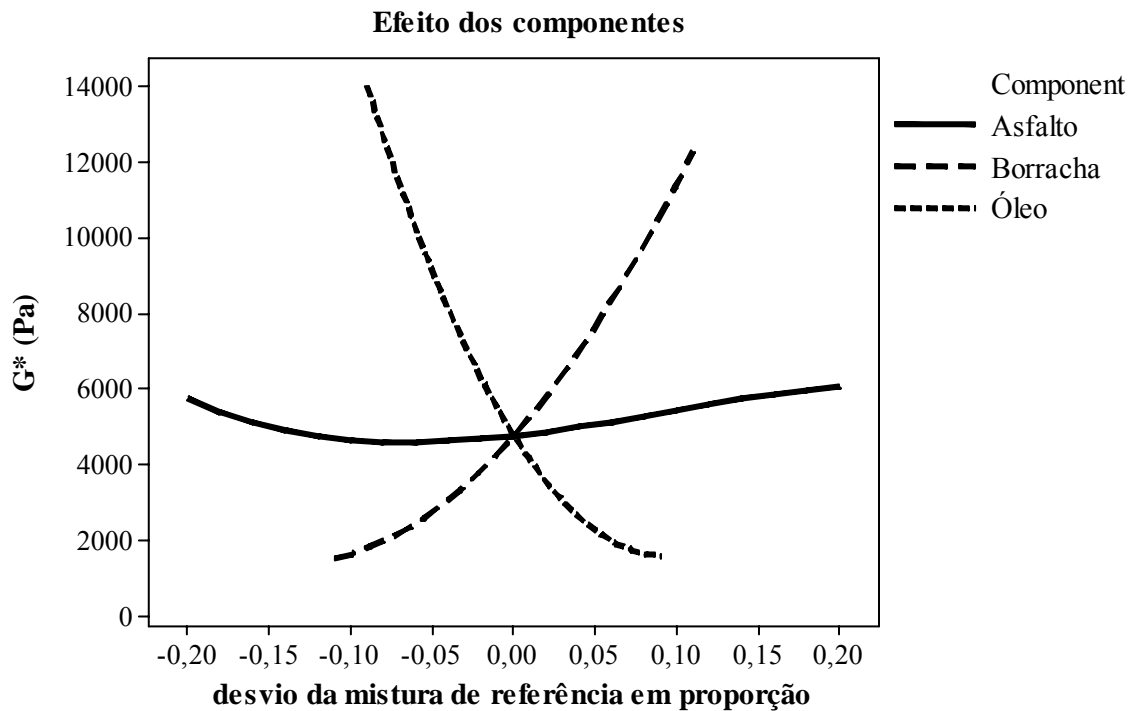


Figura 4: Efeito dos componentes sobre G^* a 64°C , 120 Pa, 10 rad/s, segundo modelo (2)

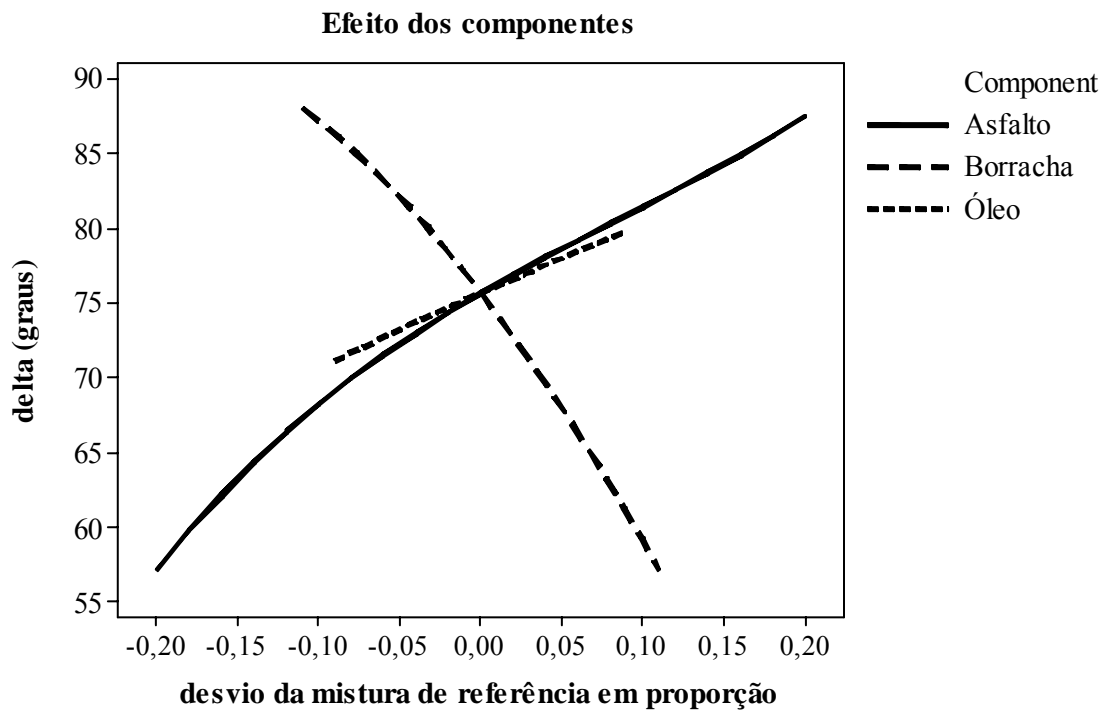


Figura 5: Efeito dos componentes sobre δ a 64°C , 120 Pa, 10 rad/s, segundo modelo (3)

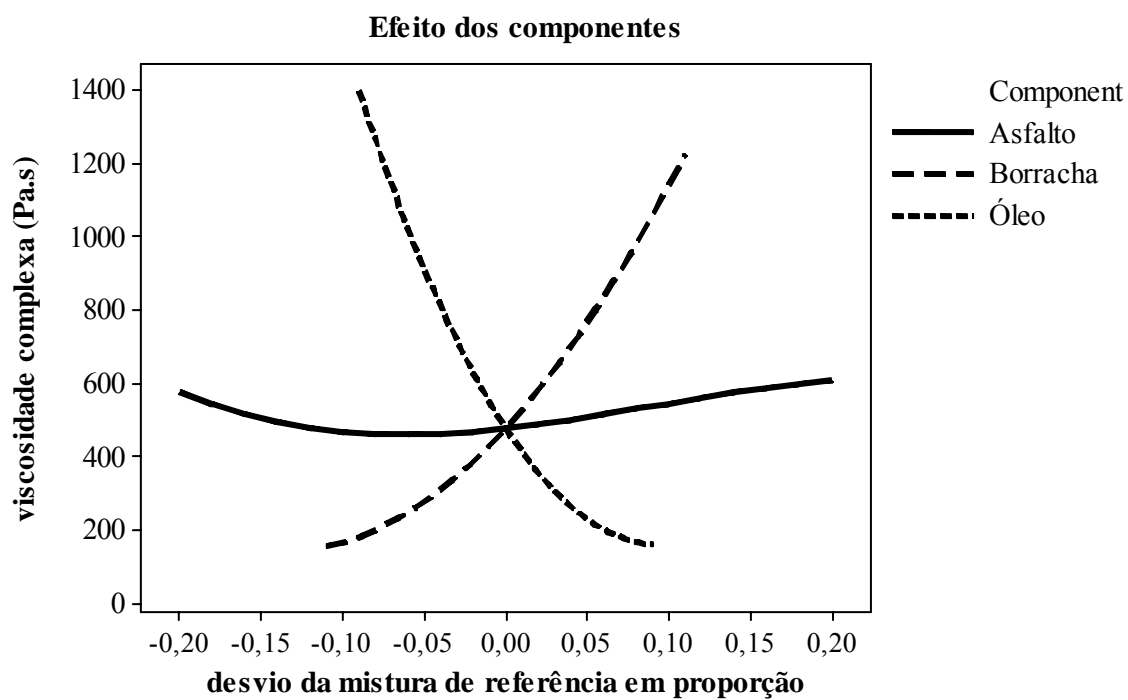


Figura 6: Efeito dos componentes sobre η^* a 64°C, 120 Pa, 10 rad/s, segundo modelo (4)

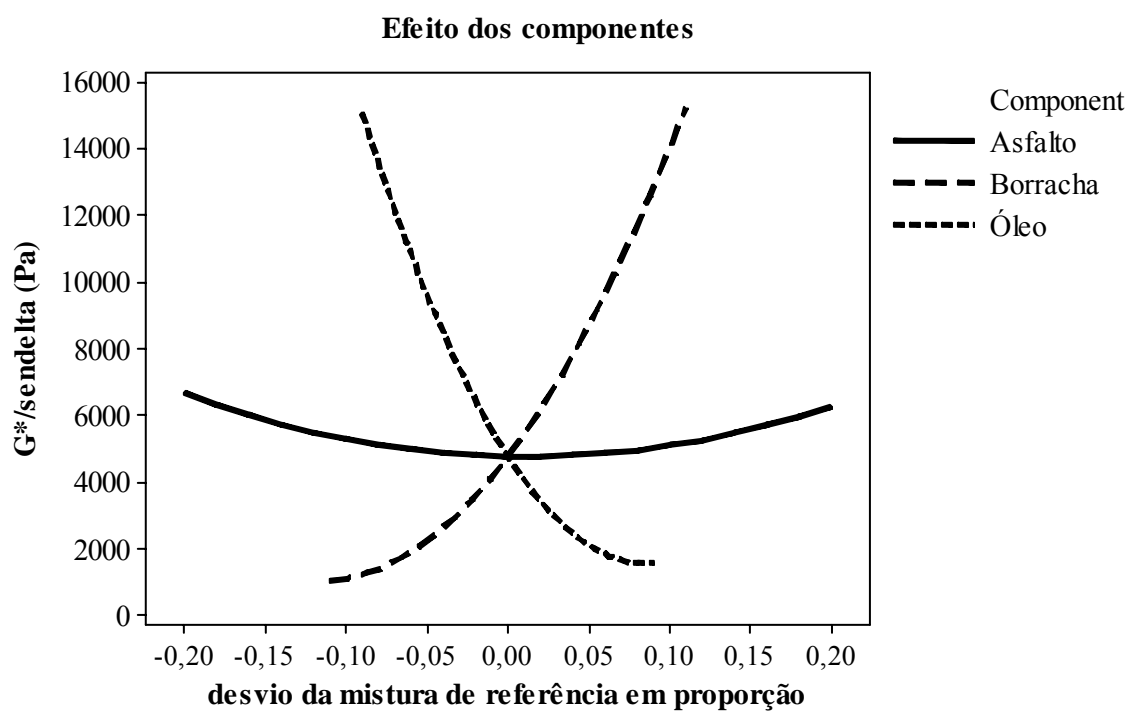


Figura 7: Efeito dos componentes sobre $G^*/\text{sen}\delta$, 64°C, 120 Pa, 10 rad/s, modelo (5)

Superfície de resposta para módulo complexo 64°C

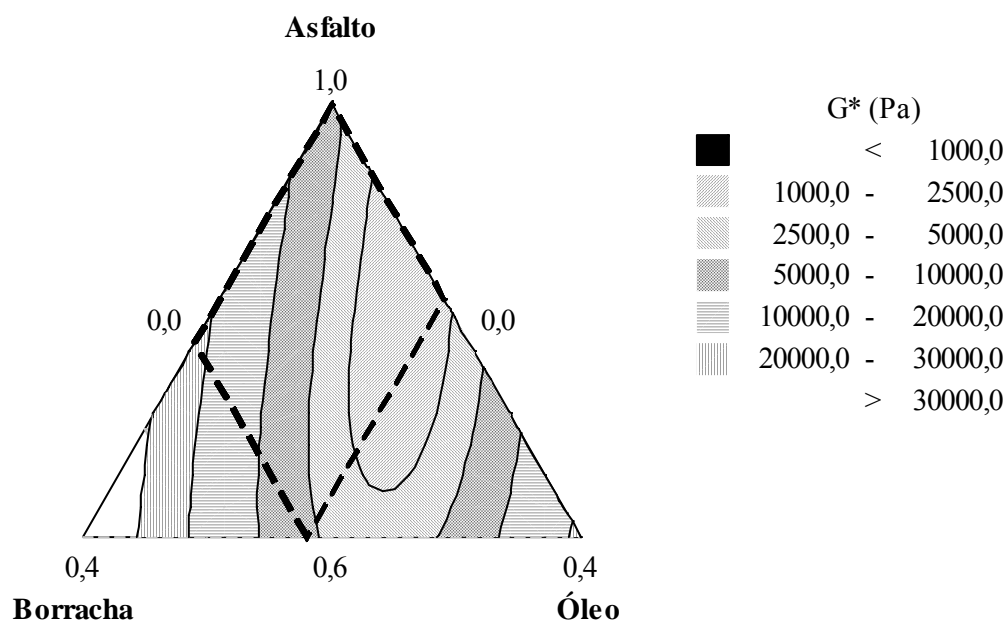


Figura 8: Superfície de resposta para G^* a 64°C, 120 Pa, 10 rad/s, segundo modelo (2)

Superfície de resposta para ângulo de fase a 64°C

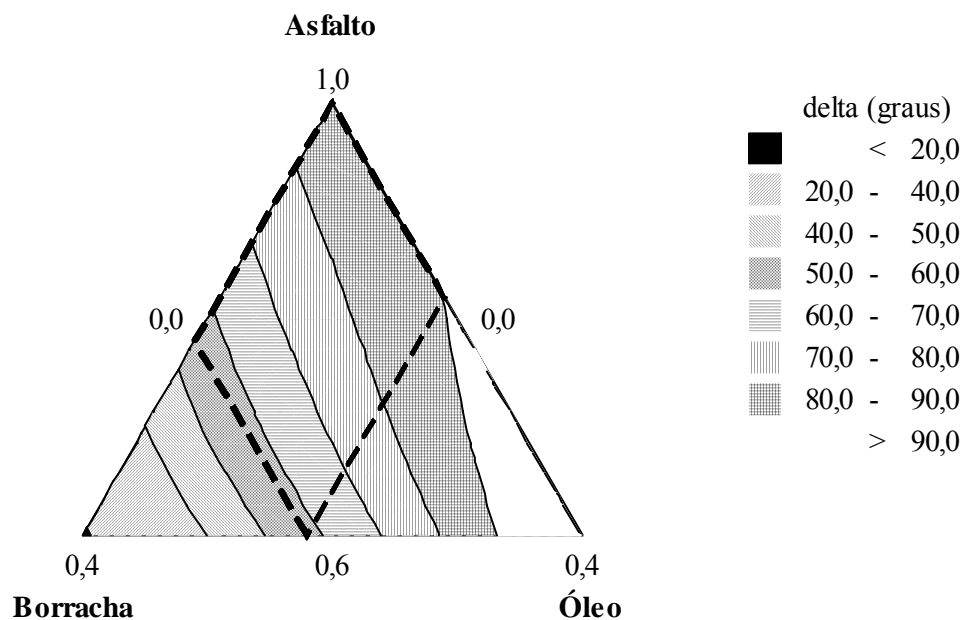


Figura 9: Superfície de resposta para δ a 64°C, 120 Pa, 10 rad/s, segundo modelo (3)

Superfície de resposta para viscosidade complexa a 64°C

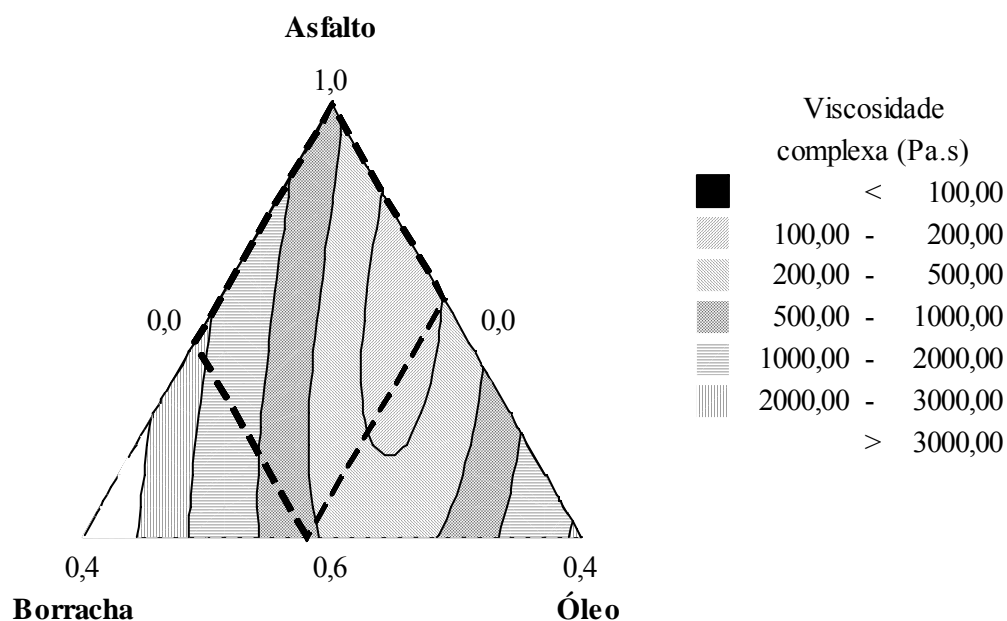


Figura 10: Superfície de resposta para η^* a 64°C, 120 Pa, 10 rad/s, segundo modelo (4)

Superfície de resposta para $G^*/\text{sendelta}$ a 64°C

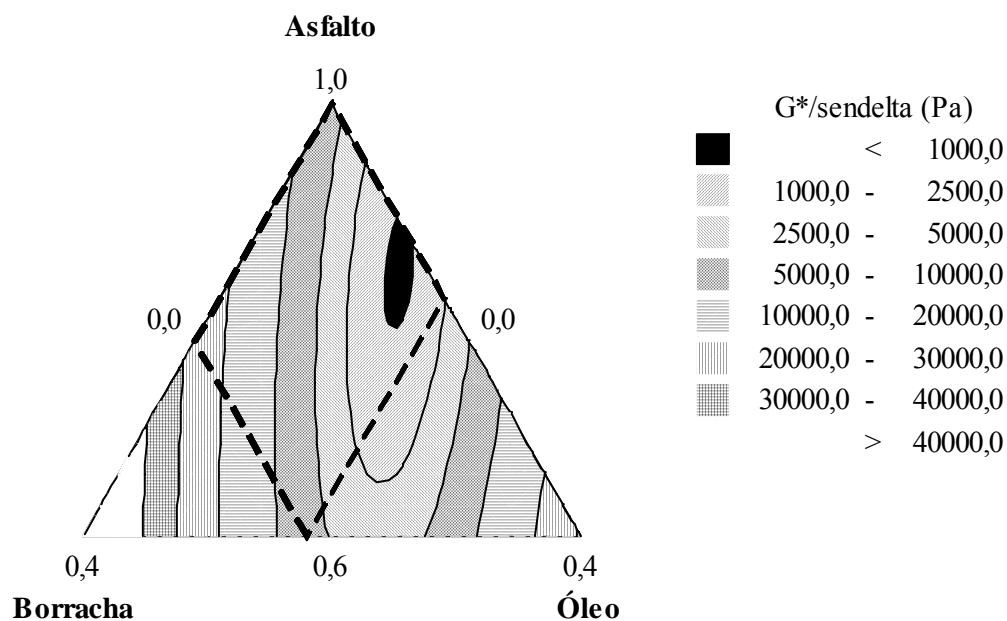


Figura 11: Superfície de resposta para $G^*/\text{sen}\delta$, 64°C, 120 Pa, 10 rad/s, segundo modelo (5)

A Figura 4 indica o efeito dos componentes sobre o módulo complexo. O efeito do asfalto é variável, dependendo da proporção presente na mistura, embora possa ser notado um ponto de

mínimo discreto para teores baixos (em torno de 70%). O módulo complexo é proporcional à proporção de borracha e inversamente proporcional à proporção de resíduo de óleo de xisto. Os efeitos da borracha e do óleo, embora antagônicos, têm intensidade semelhante, sendo o efeito do óleo ligeiramente mais intenso sobre a variação de G^* . Variações no teor de borracha para baixos teores de borracha (próximos de 0%) e no teor de óleo para teores altos de óleo (próximos de 18%) têm efeito pequeno sobre a resistência total do ligante. O efeito dos componentes sobre a viscosidade complexa (Figura 6) é idêntico ao efeito sobre G^* , uma vez que η^* é combinação linear de G^* .

O ângulo de fase (Figura 5) é diretamente proporcional aos teores de asfalto e de óleo e inversamente proporcional ao de borracha. Asfalto e óleo são concorrentes, embora o efeito do asfalto seja ligeiramente maior em aumentar δ . O ângulo de fase varia de forma praticamente linear com os componentes. Embora significativo em todas as situações analisadas, o efeito do asfalto é muito mais bem definido e pronunciado sobre o ângulo de fase. O parâmetro $G^*/\sin\delta$ (Figura 7) varia de forma aproximadamente parabólica com a porcentagem de asfalto, com ponto de mínimo próximo da mistura de referência. O parâmetro $G^*/\sin\delta$ é diretamente proporcional à proporção de borracha e inversamente proporcional à proporção de resíduo de óleo de xisto. Variações no teor de borracha para baixos teores de borracha (próximos de 0%) e no teor de óleo para teores altos de óleo (próximos de 18%) têm efeito pequeno sobre a resistência do ligante à deformação permanente. O aspecto geral das curvas para $G^*/\sin\delta$ e G^* é semelhante, indicando a pequena sensibilidade do parâmetro às variações do ângulo de fase.

As superfícies de resposta fornecem uma representação espacial dos efeitos de interação dos componentes. Esse recurso é bastante útil na seleção de composições dentro de faixas de valores de interesse e de limites de especificação. As Figuras 8, 10 e 11 indicam que é possível obter valores mais altos de módulo complexo, de viscosidade complexa e de $G^*/\sin\delta$ por meio de composição com proporções altas de borracha e baixas de óleo de xisto. Nesses casos, o efeito da proporção de asfalto é pequeno (linha praticamente reta que liga o vértice da mistura com 100% de asfalto ao lado oposto da figura). Empregando-se proporções dos componentes nas mesmas faixas do experimento, é possível obter misturas com valores de G^* entre 1,0 e 20,0 kPa e de η^* entre 100,0 e 2.000,0 Pa.s.

Na Figura 11, constata-se a existência de uma área cujas misturas proporcionam valores do parâmetro de deformação permanente inferiores ao exigido pela especificação Superpave ($G^*/\sin\delta < 1,0$ kPa). As misturas dessa região são compostas de proporções baixas de borracha e altas de óleo. Na Figura 9, verifica-se que os valores de δ tendem a aumentar na direção das misturas com proporções baixas de borracha e altas de óleo. Para uma mesma proporção de borracha, o efeito do óleo é pequeno (linhas paralelas ao lado asfalto-óleo). Nos limites do experimento, é possível obter misturas com ângulo de fase com valores próximos a 60° até 90°.

10. CONCLUSÕES

O monitoramento de propriedades viscoelásticas fundamentais dos ligantes, associado ao uso de técnicas estatísticas de planejamento experimental e de análise de dados, fornece subsídios para a obtenção de conclusões elucidativas acerca do efeito de variações nas proporções dos componentes. Medidas de módulo complexo, de ângulo de fase e de viscosidade complexa efetuadas em ligantes virgens, na temperatura de 64°C, indicaram que a borracha moída de

pneus descartados e o resíduo de óleo de xisto têm efeitos antagônicos. A borracha tende a aumentar a viscosidade e a resistência total do ligante e a diminuir o ângulo de fase, o que se traduz em misturas com maiores valores de $G^*/\sin\delta$. O óleo tende a reduzir a viscosidade e a resistência total do ligante e a aumentar o ângulo de fase, o que se traduz em misturas com valores mais baixos de $G^*/\sin\delta$. Embora significativo em todas as situações analisadas, o efeito do asfalto é muito mais bem definido e pronunciado sobre o ângulo de fase, concorrendo com o efeito do resíduo de óleo de xisto.

Na extensão em que o parâmetro de deformação permanente da especificação Superpave consegue detectar a resistência do ligante à manifestação desse defeito da camada asfáltica e na extensão em que o ligante consegue contribuir com a resistência da mistura asfáltica, o efeito da borracha é positivo e o do resíduo de óleo de xisto é negativo. A magnitude dos benefícios e dos prejuízos se deve à combinação de proporções. Quando combinados em proporções adequadas, esses modificadores proporcionam um grande número de alternativas, de forma a atender os requisitos de especificação, conforme indicado pelas superfícies de resposta.

Agradecimentos

Os autores agradecem à SIX-Petrobras, pelo fornecimento do óleo de xisto, à Reduc-Petrobras, pelo fornecimento do asfalto, 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, ao Núcleo de Reologia e Processamento de Polímeros (NRPP, DEMa-UFSCar), pela disponibilização do laboratório para realização de ensaios, ao professor John Cornell, da Universidade da Florida, Estados Unidos, pela orientação no delineamento do experimento e à FAPESP pela concessão de bolsa de doutorado ao primeiro autor.

BIBLIOGRAFIA

- Anderson, D. A.; D. W. Christensen e H. U. Bahia (1991) Physical Properties of Asphalt Cement and the Development of Performance-related Specifications. *Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 60, p. 437-456.
- Anderson, D. A.; D. W. Christensen; H. U. Bahia; R. Dongré; M. G. Sharma, C. E. Antle e J. Button (1994) Binder Characterization and Evaluation: Volume 3 – Physical Characterization. Washington. *Strategic Highway Research Program*, National Research Council. Report SHRP-A-369.
- Bahia, H. U e D. A. Anderson (1995) Strategic Highway Research Program Binder Rheological Parameters: Background and Comparison with Conventional Properties. *Transportation Research Record*, n. 1488, p. 32-39.
- Cornell, J. A. (1990) *Experiments with Mixtures: Design, Models, and the Analysis of Mixture Data*. 2nd. ed., John Wiley & Sons, New York.

Endereço dos autores:

Adalberto Leandro Faxina e Manoel Henrique Alba Sória

Departamento de Transportes, EESC-USP, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13 560-970, São Carlos, SP, (16) 3373 9611, fax (16) 3373 9602, alfaxina@sc.usp.br e mane@sc.usp.br

Leni Figueiredo Mathias Leite

Centro de Pesquisas Leopoldo A. M. de Mello (Cenpes-Petrobras), Ilha do Fundão, Quadra 7, Cidade Universitária, 21 949-598, Rio de Janeiro, RJ, (21) 3865 6736, fax (21) 3865 6771, leniml@petrobras.com.br

Rosário Elida Salum Bretas

Departamento de Engenharia de Materiais, UFSCar, Rod. Washington Luiz, km 204, 13 560-740, São Carlos, SP, (16) 3351 8510, bretas@power.ufscar.br