

REOLOGIA DE ASFALTOS BRASILEIROS PUROS E MODIFICADOS POR SBS

Maria da Conceição Cavalcante Lucena

Sandra de Aguiar Soares

Laboratório de Polímeros/UFC

Jorge Barbosa Soares

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos /UFC

Leni Figueiredo Mathias Leite

Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Melo/Petrobras

RESUMO

Este trabalho apresenta a caracterização reológica de cimentos asfálticos (CAP's), produzidos a partir de petróleo Brasileiro descoberto em 2000 (campo Fazenda Alegre), em comparação a CAP's produzidos em refinarias Brasileiras, porém oriundos de petróleos estrangeiros (Venezuelano e Árabe). O efeito do estireno-butadieno-estireno (SBS) nas características reológicas do CAP Fazenda Alegre também foi estudado e comparado ao efeito provocado pelo polímero no CAP Árabe. A reologia foi investigada por ensaios dinâmicos-mecânicos e viscosimétricos. O CAP Fazenda Alegre apresentou propriedades reológicas próximas dos CAP's oriundos de petróleos estrangeiros, tais como, comportamento Newtoniano; dependência do módulo complexo de cisalhamento com a temperatura, frequência e tensão; bem como, praticamente a mesma região de viscoelasticidade linear. Quando modificado por SBS, o CAP Fazenda Alegre apresentou as mesmas melhorias observadas para o CAP Árabe modificado, evidenciadas pelo alargamento da região de viscoelasticidade linear, assim como aumento da rigidez, elasticidade e resistência à deformação permanente.

ABSTRACT

This work presents the rheological characterization of asphalt cements (AC), produced from a Brazilian petroleum discovered in 2000 (Fazenda Alegre field), in comparison to AC's produced in Brazilian refineries, originated from foreign petroleum (Venezuelan and Arabian). The effect of styrene-butadiene-styrene (SBS) on the rheological characteristics of Fazenda Alegre AC was also studied and compared to the polymer effect on the Arabian AC. The rheology was investigated by dynamic-mechanical and viscosimetric analysis. The Fazenda Alegre AC showed rheological properties similar to the foreign petroleum AC, such as Newtonian behavior; variation of complex shear modulus as a function of temperature, frequency and stress, as well as almost the same linear viscoelastic region. When modified by SBS, the Fazenda Alegre AC presented the same improvement observed by the Arabian AC, evidenced by a wider linear viscoelastic range, as well as greater stiffness, elasticity and resistance to permanent deformation.

1. INTRODUÇÃO

Cimentos asfálticos de petróleo (CAP's) produzidos pelo refino do petróleo atendem satisfatoriamente a maioria das situações nas quais os pavimentos são submetidos. Contudo, nos últimos anos, as rodovias de alto volume de tráfego apresentam aumento no VMD (Número de veículos médio diário), maior peso nos caminhões, aumento da carga por eixo e aumento da pressão dos pneus, requerendo revestimentos betuminosos mais resistentes, utilizando técnicas construtivas mais modernas que necessitam de propriedades melhoradas para os CAP's. A modificação de CAP's por polímeros tem sido uma solução para suprir algumas deficiências do CAP e melhorar propriedades como a susceptibilidade térmica, resistência à deformação permanente e à trincas térmicas (Airey, 2003). Existem vários estudos que mostram uma melhoria nas propriedades físicas e mecânicas dos asfaltos convencionais com a adição do copolímero estireno-butadieno-estireno (SBS) (Isacsson e Lu, 1997, 1998; Leite, 1999; Costa, 2002; Wen, 2002; Lucena *et al.*, 2003).

Quando aplicados em revestimentos rodoviários, os asfaltos são submetidos a tensões estáticas e dinâmicas, a variações de temperaturas, bem como a condições ambientais diversas. Conseqüentemente, é essencial a compreensão das propriedades reológicas a diferentes taxas de cisalhamento, temperaturas e frequências. Estas são úteis também como

ferramentas para se distinguir diferenças entre os vários CAP's produzidos a partir de diferentes fontes de petróleo cru e processos de refino. No Brasil, em virtude do preço elevado do petróleo importado e recentes descobertas de petróleo pesado (campo Fazenda Alegre no estado do Espírito Santo explorado a partir do ano 2000), as refinarias produtoras de asfalto vêm substituindo petróleos estrangeiros por petróleos brasileiros. A unidade de Negócios da Petrobras no Ceará (Lubnor) substituiu gradativamente o petróleo Bachaquero pelo petróleo Fazenda Alegre para produção de CAP. Entendendo-se a reologia desses novos CAP's pode-se determinar temperaturas apropriadas de compactação, grau de desempenho desses ligantes, etc.

Segundo Bretas e D'Ávila (2000), reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria; analisa as respostas (deformações ou tensões) de um material provocadas pela aplicação de uma tensão ou uma deformação. O material pode estar tanto no estado líquido como no estado gasoso ou sólido. Materiais de elevado peso molecular como os CAP's e o SBS possuem um comportamento viscoelástico, que se caracteriza por apresentar ao mesmo tempo características de materiais sólidos e de materiais líquidos. Em temperaturas suficientemente baixas e/ou altas taxas de carregamento (frequência), o asfalto se comporta essencialmente como um sólido elástico. Quando a temperatura aumenta e/ou quando a taxa de carregamento diminui, a propriedade viscosa do asfalto se torna mais evidente. Em temperaturas suficientemente altas e/ou em longo tempo de aplicação de cargas, o asfalto é essencialmente um líquido Newtoniano e pode ser descrito por um valor de viscosidade independente da taxa de aplicação de carga.

É necessário se conhecer as condições nas quais os CAP's se comportam como viscoelásticos lineares para que se possa obter os parâmetros viscoelásticos tais como módulo complexo (G^*), ângulo de fase (δ), módulo elástico (G') recuperável e o módulo viscoso (G'') não-recuperável já que estes são definidos dentro de uma região de viscoelasticidade linear. Várias publicações tratam da importância de se estudar os limites da linearidade dos ligantes betuminosos e principalmente se forem modificados por polímeros (Collins *et al.*, 1991; Goodrich, 1991; Bahia *et al.*, 1998, 1999). Soares e Souza (2002) descreveram uma metodologia para se verificar o comportamento viscoelástico linear em misturas asfálticas (CAP's + agregados) através de ensaios de laboratório. Existem vários estudos (Cheung e Cebon, 1997a, 1997b, 1997c; Airey, 2002) que mostram uma larga região de viscoelasticidade linear de CAP's, porém devido a novos petróleos descobertos recentemente no Brasil faz-se necessário um estudo da região de viscoelasticidade linear dos CAP's produzidos nas refinarias brasileiras e o efeito do polímero tendo-se em vista que a adição de polímeros ao CAP vem sendo praticada no Brasil desde a década de 90 e, especificamente, na região Nordeste a partir do ano de 1995 (Costa, 2002).

As propriedades reológicas dos asfaltos podem influenciar significativamente o desempenho das misturas asfálticas durante o processo de usinagem, compactação e vida em serviço. Por estes motivos incluem-se alguns testes reológicos nas especificações vigentes no Brasil, regulamentadas pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), compostas de ensaios físicos e empíricos. Um programa de pesquisa desenvolvido de 1987 a 1992 nos Estados Unidos estabeleceu novas especificações para os ligantes asfálticos. O Programa foi o *Strategic Highway Research Program* (SHRP) e as especificações resultantes foram denominadas *Superior Performance Pavements* (Superpave) (SHRP, 1994; Motta *et al.*, 1996). Os ensaios reológicos fazem parte com maior peso destas especificações em relação às especificações

ANP, por se entender que a reologia de um material medida nos ensaios Superpave é diretamente ligada ao desempenho em campo através de princípios básicos de engenharia. Nas especificações Superpave o CAP é classificado pela temperatura máxima e mínima a que o pavimento é submetido em serviço, calculadas a partir de parâmetros reológicos (G^* e δ). A classificação por temperatura máxima é usada para se garantir a resistência à deformação permanente, enquanto que a mínima é utilizada na subclassificação do CAP e indica a resistência à formação de trincas térmicas. Neste programa introduziram-se também as especificações para ligantes modificados por polímeros. As especificações Superpave ainda não são regulamentadas no Brasil pela ANP, porém a Petrobras já pratica estas especificações internamente (Leite e Tonial, 1994).

O objetivo deste trabalho é caracterizar reologicamente o CAP Fazenda Alegre e compará-lo aos CAP's que vêm sendo produzidos nas refinarias a partir de destilações, em um e dois estágios, de petróleos estrangeiros (Venezuelano e Árabe) e verificar como o polímero SBS pode afetar as propriedades reológicas destes CAP's. Os parâmetros avaliados serão a viscosidade absoluta a altas temperaturas, G^* e δ obtidos a partir de ensaios dinâmico-mecânicos a temperaturas na faixa de 45 a 90 °C. Um estudo da região da viscoelasticidade linear dos CAP's puros e modificados por SBS também será realizado para possibilitar a definição dos parâmetros viscoelásticos (G^* e δ). O grau de desempenho (classe PG) dos CAP's será determinado para a temperatura máxima a partir de ensaios reológicos baseados nas especificações Superpave.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Ensaios Dinâmico-mecânicos

O reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) é usado para a realização de ensaios dinâmico-mecânicos. O DSR mede o G^* e o δ . G^* é formado por dois componentes: o G' recuperável e G'' não-recuperável. G' e G'' podem ser calculados utilizando-se as equações 1 e 2, respectivamente.

$$G' = |G^*| \cos \delta \quad (1)$$

$$G'' = |G^*| \sin \delta \quad (2)$$

A teoria clássica define um sólido elástico como um material que exibe uma tensão proporcional a uma deformação. No outro extremo existem os fluidos perfeitamente viscosos (Newtonianos) que exibem a tensão proporcional a taxa de deformação e não a deformação (Bretas e D'Ávila 2000). Um material viscoelástico exibe um comportamento viscoso e elástico e mostra uma relação dependente do tempo entre a tensão aplicada e a deformação resultante. Dentro de uma região linear de viscosidade, a relação da tensão/deformação é influenciada pelo tempo somente e não pela magnitude da tensão.

O DSR é usado no método Superpave para medir propriedades do ligante a temperaturas elevadas e intermediárias de pavimentos em serviço. As temperaturas nas quais o ensaio é de fato realizado são baseadas na temperatura de serviço onde o CAP será utilizado. Um alto módulo de cisalhamento complexo G^* representará maior rigidez enquanto que um menor δ representará uma maior resposta elástica, portanto, recuperável. Na determinação do parâmetro para controle de deformação permanente, os pesquisadores do projeto SHRP (SHRP, 1994) consideram o fenômeno de cargas cíclicas. A cada ciclo de carga está sendo realizado um trabalho para deformar a superfície asfáltica. Parte desse trabalho é recuperado e parte dissipado na forma de deformação permanente e calor. A fim de minimizar as deformações permanentes, a quantidade de trabalho dissipado durante cada ciclo deve ser

reduzida. Matematicamente, o trabalho dissipado por ciclo de carregamento (a tensão constante) (W_c) é dado pela equação 3.

$$W_c = \pi \sigma_0^2 [1/(G^*/\text{sen}\delta)] \quad (3)$$

em que σ_0 é a tensão aplicada durante o ciclo de carregamento. Portanto, o trabalho dissipado é inversamente proporcional a $G^*/\text{sen}\delta$. Esse parâmetro foi selecionado como uma especificação Superpave para ligantes asfálticos.

2.2. Viscosidade

O conceito de viscosidade segundo Barnes *et al.* (1989) é relativo a resistência ao escoamento. A força por unidade de área (τ), denominada tensão de cisalhamento, requerida para produzir o escoamento é proporcional ao gradiente de velocidade denominado de taxa de cisalhamento $d\gamma/dt$ conforme mostrado na equação 4. A constante de proporcionalidade, η , é denominada de coeficiente de viscosidade.

$$\tau = \eta \, d\gamma/dt \quad (4)$$

Um fluido é dito Newtoniano quando a relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento é linear e a viscosidade decresce com a temperatura exponencialmente de acordo com a equação de Arrhenius (Barnes *et al.*, 1989):

$$\eta = A e^{-B/T} \quad (5)$$

em que T é a temperatura absoluta, sendo A e B constantes específicas do líquido. Quando a viscosidade depende da taxa, o fluido é denominado pseudoplástico ou dilatante.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

3.1.1. CAP's

Foram utilizados três tipos de CAP's. Um CAP20 produzido na REDUC (Refinaria Duque de Caxias) a partir de um petróleo Árabe leve em dois estágios de destilação, seguido por desasfaltação a propano com posterior diluição com extrato aromático e classificado por viscosidade. A amostra foi denominada CAPRE. Dois CAP's 50/60 processados na Lubnor por destilação em um único estágio e classificado por penetração. Os CAP's foram oriundos do petróleo da Fazenda Alegre no Brasil (CAPFA) e do campo Bachaquero na Venezuela (CAPBA). As características dos CAP's estão demonstradas na Tabela 1.

3.1.2. Polímero

O copolímero SBS foi fornecido pela SHELL na forma de pó. As características do polímero são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1: Características dos CAP's utilizados.

Asfalto	CAPRE	CAPFA	CAPBA
Asfaltenos %	8,4	11,3	10
Viscosidade a 60 °C, P	2.646	4.003	3.300
Penetração a 25 °C, 100 g, 5 s, dmm	50	51	55
Ponto de amolecimento	49,2	50,1	52

3.2. Métodos

3.2.1. Preparo das Misturas

As misturas de CAP's modificados por polímero foram feitas com os CAPFA e CAPRE utilizando-se um diluente aromático como agente compatibilizante e 4,5% em peso de SBS.

Tabela 2: Características do SBS utilizado.

Polímero	SBS SHELL
Estrutura	Linear
Peso molecular numérico médio	99.080
Estireno %p/butadieno total %p	31,4/68,6

As amostras foram denominadas CAPFASBS e CAPRESBS. O CAPBA não foi modificado por SBS por ser considerado um CAP excelente para pavimentação, não sendo necessário a introdução de aditivos (Rodrigues *et al.*, 1995). Os CAP's modificados foram preparados utilizando-se um agitador de baixo cisalhamento IKA modelo RW20 com agitação constante de 1.086 rpm por um período de 3 horas na temperatura de 175 °C.

3.2.2. Ensaio de Envelhecimento

Os CAP's modificados por polímeros e não modificados foram testados usando uma estufa de filme fino rotativo RTFOT (fabricante DESPATCH) conforme o ASTM D2872 (1997). Esse método de teste indica, aproximadamente, mudanças nas propriedades do asfalto que podem ocorrer durante a usinagem a 150 °C indicadas por variações nas medidas reológicas. Em recipientes de vidros foram pesadas aproximadamente 35 g de amostra. As amostras foram aquecidas a 163 °C durante 85 minutos. A especificação Superpave considera a alteração das propriedades reológicas ocorridas após o envelhecimento do CAP para a determinação do grau de desempenho do ligante, tornando necessário a realização deste ensaio para possibilitar a classificação dos CAP's pelo Superpave.

3.2.3. Determinação da Viscosidade

A viscosidade absoluta foi determinada conforme o ASTM D4402 (1987) nas seguintes temperaturas: 135, 150, 165 e 175 °C a diferentes taxas de cisalhamento, utilizando-se o viscosímetro Brookfield modelo DVII⁺ acoplado a um controlador de temperatura THERMOSEL.

3.2.4. Ensaio Dinâmico-Mecânico

Os ensaios dinâmico-mecânicos foram estudados nos CAP's puros e modificados utilizando-se um reômetro de cisalhamento dinâmico da Rheometrics, modelo DSR 5. Em um molde de silicone foi preparado um corpo de prova de aproximadamente 1 mm de espessura e 25 mm de diâmetro e testado em *spindles* de placas paralelas com diâmetro de 25 mm. Para determinação da região de viscoelasticidade linear foi realizada uma varredura do módulo complexo em função da tensão de cisalhamento nas frequências de 0,1; 1 e 10 Hz e temperaturas de 52, 58 e 64 °C, possibilitando assim a definição da região em função da frequência e temperatura. Uma varredura do módulo complexo em função da frequência na tensão de 100 Pa nas temperaturas de 52, 58 e 64 °C foi realizada. O efeito da temperatura nos parâmetros G^* e δ à tensão de 120 Pa e 1,6 Hz foi verificado testando-se os CAP's no intervalo de 45 a 90 °C. Com o objetivo de se correlacionar os parâmetros viscoelásticos com o desempenho dos CAP's verificou-se o comportamento do $G^*/\text{sen}\delta$ em função da temperatura, utilizando-se como base a norma AASHTO TP5 (1993) e ASTM 6373 (1999) numa tensão de cisalhamento de 120 Pa e frequência de 1,6 Hz.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Determinação da Viscosidade

O comportamento Newtoniano dos CAP's puros foi evidenciado pelos gráficos das Figuras 1

e 2, que mostram um comportamento linear e exponencial, respectivamente. Calculou-se pelo programa Origin versão 7,0 o fator de correlação linear das curvas obtidas nas Figuras 1 e 2, obtendo-se o valor 1 para as retas da Figura 1 e para as exponenciais da Figura 2.

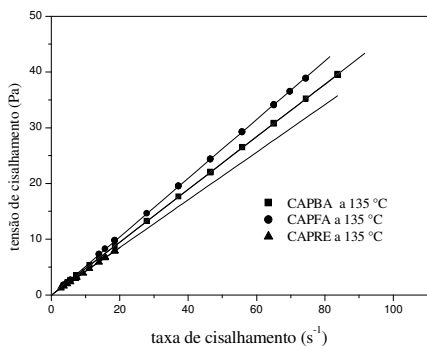


Figura 1: Gráfico da tensão em função da taxa de cisalhamento para os CAP's puros a 135 °C.

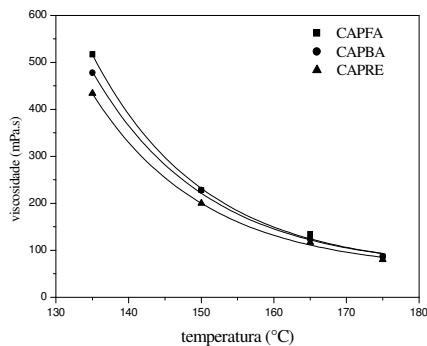


Figura 2: Gráfico da viscosidade em função da temperatura para os CAP's puros.

Um comportamento Newtoniano também foi verificado para os CAP's modificados por SBS evidenciado pelos mesmos parâmetros observados para o CAP puro (Figuras 3 e 4). Observou-se que o SBS aumentou a viscosidade do CAPFA e CAPRE nas temperaturas estudadas (Figura 5). Alguns trabalhos (Zanzotto *et al.*, 1989; Leite, 1999; Bahia e Hanson, 2000) relatam um comportamento não Newtoniano-pseudoplástico para CAP modificado por polímero a temperaturas superiores a 100 °C. Entretanto, não se observou esse comportamento no CAPFA e CAPRE. Atribui-se a não alteração do comportamento Newtoniano do CAP à natureza altamente aromática do diluente utilizado como compatibilizante no preparo da mistura. Esta aromaticidade faz com que o parâmetro de solubilidade do SBS esteja muito próximo do ligante asfáltico, acarretando compatibilidade termodinâmica traduzida por ausência de formação de aglomerados e alinhamento das moléculas quando submetidas a forças cisalhantes.

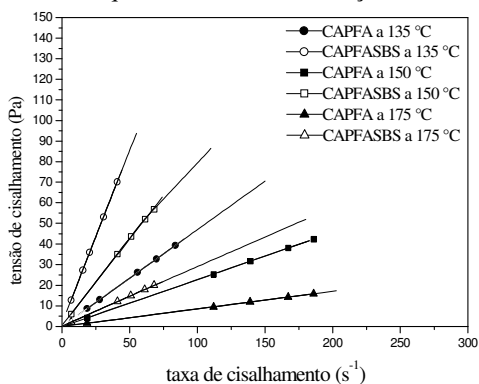


Figura 3: Curvas da tensão em função da taxa de cisalhamento do CAPFA e CAPFASBS a várias temperaturas.

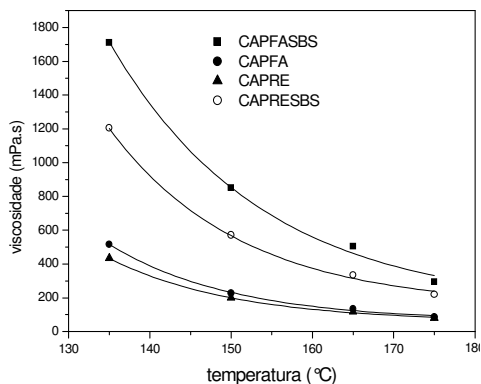


Figura 4: Viscosidades do CAPFA e CAPRE puro e modificado por SBS em função da temperatura.

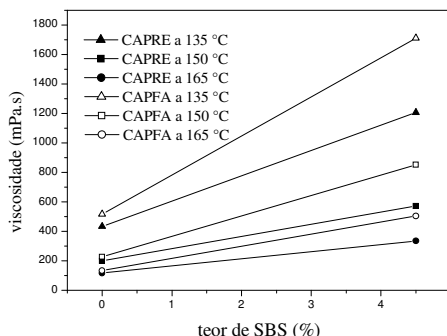


Figura 5: Viscosidade em função do teor de SBS para os CAPRE e CAPFA a temperaturas de 135, 150 e 165 °C.

4.2. Ensaios Dinâmicos-Mecânicos

4.2.1. Determinação da Região Viscoelástica Linear de Asfaltos

A região da viscoelasticidade linear foi definida pelo intervalo onde o módulo complexo não variou com a tensão de cisalhamento, considerando-se uma precisão de 5%, à temperatura e frequência constantes (Tabela 3), conforme descrito no estudo SHRP (Anderson, 1994). Com o objetivo de se estabelecer a região de viscoelasticidade linear para definir os parâmetros viscoelásticos, construíram-se curvas de módulo complexo em função da tensão de cisalhamento para os CAP's a diferentes temperaturas e frequências. As Figuras 6 e 7 mostram estes resultados para os CAPBA, CAPRE e CAPFA a 52 e 58 °C, respectivamente. Verificou-se que numa mesma temperatura o CAPFA apresentou praticamente o mesmo comportamento do CAPBA para as frequências de 0,1; 1 e 10 Hz e, à medida que se diminui a frequência, diminui a região de viscoelasticidade linear nos três CAP's estudados. A Figura 8 mostra o efeito da temperatura para os CAPBA, CAPRE e CAPFA à frequência de 1 Hz, onde se verifica uma diminuição da região de viscoelasticidade linear à medida que se aumenta a temperatura.

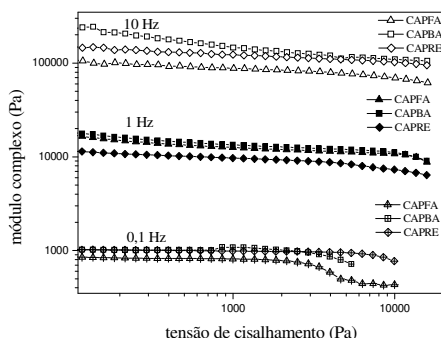


Figura 6: Curvas de G^* em função da tensão para os CAP's puros a 52 °C.

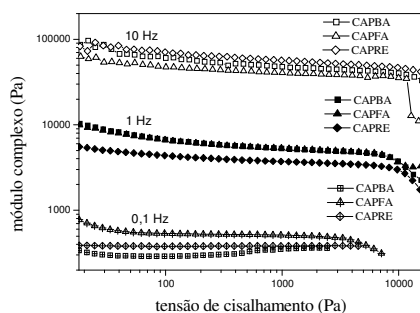


Figura 7: Curvas de G^* em função da tensão para os CAP's puros a 58 °C.

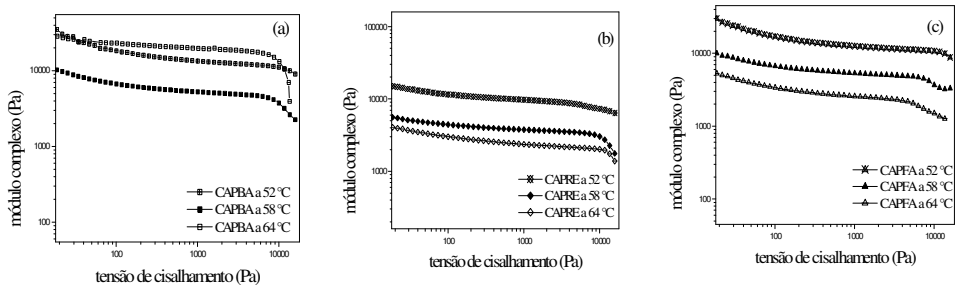


Figura 8: Efeito da temperatura na região de viscoelasticidade linear para o CAPBA (a), CAPRE (b) e CAPFA (c).

Tabela 3: Definição de limites da região viscoelástica linear dos CAPFA, CAPRE e CAPBA.

Amostra	Região Viscoelástica Linear (Pa)					
	52 °C			58 °C		
	0,1 Hz	1 Hz	10 Hz	0,1 Hz	1 Hz	10 Hz
CAPFA	0 - 3.500	0 - >10.000	0 - >10.000	0 - 3.000	0 - 9.000	0 - >10.000
CAPRE	0 - 6.500	0 - > 10.000	0 - >10.000	0 - 5.000	0 - 9.000	0 - >10.000
CAPBA	0 - 3.000	0 - >10.000	0 - >10.000	0 - 2.500	0 - 9.000	0 - >10.000

Um estudo semelhante foi realizado para o CAP modificado verificando-se o efeito do SBS nos CAPFA e CAPRE. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 9. Observou-se que o SBS alargou a região de viscoelasticidade linear dos CAPFA e CAPRE. A avaliação do efeito da temperatura para o CAP modificado mostrou que a região de viscoelasticidade linear também foi reduzida com o aumento da temperatura (Figura 10).

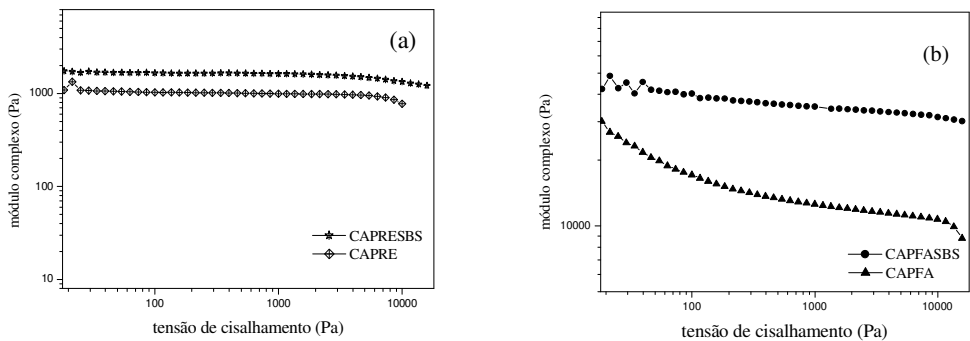


Figura 9: Efeito do SBS na região de viscoelasticidade linear dos CAPRE (a) e CAPFA (b).

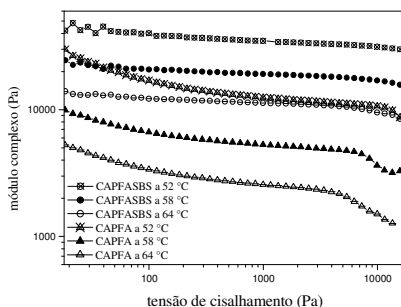


Figura 10: Efeito da temperatura na região de viscoelasticidade linear do CAPFA e CAPFASBS.

4.2.2. Determinação de Parâmetros Viscoelásticos Dinâmicos

A dependência da frequência com o módulo complexo e o ângulo de fase é ilustrada nas Figuras 11 e 12 para o CAPRE e Figuras 13 e 14 para o CAPFA, respectivamente. Observou-se um aumento linear do G^* e uma diminuição praticamente exponencial do δ com a frequência para os dois CAP's estudados nas temperaturas de 52, 58 e 64 °C.

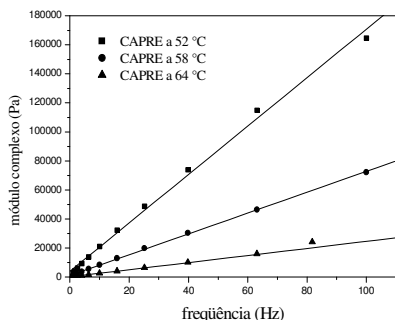


Figura 11: G^* em função da frequência para o CAPRE às temperaturas de 52, 58 e 64 °C.

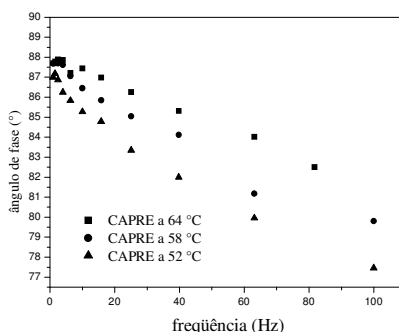


Figura 12: δ em função da frequência para o CAPRE às temperaturas de 52, 58 e 64 °C.

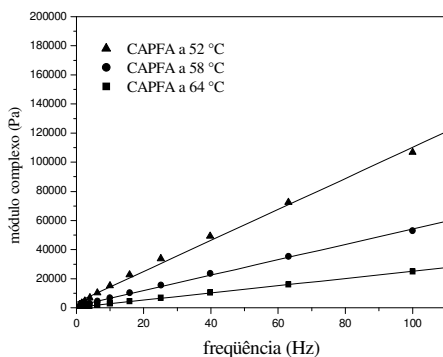


Figura 13: G^* em função da frequência para o CAPFA às temperaturas de 52, 58 e 64 °C.

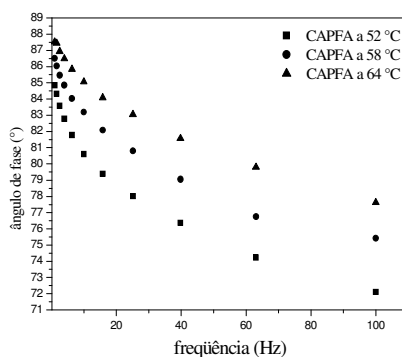


Figura 14: δ em função da frequência para o CAPFA às temperaturas de 52, 58 e 64 °C.

A partir das Figuras 11 a 14, observa-se que CAPFA oriundo de petróleo naftênico com maior teor de asfaltenos apresenta melhor susceptibilidade térmica do que o CAPRE (menor variação de módulo com a temperatura) e maior elasticidade tendo em vista os menores valores do ângulo de fase a mesma temperatura.

O estudo do módulo complexo e ângulo de fase em função da temperatura a 1,6 Hz está demonstrado nas Figuras 15 e 16 para os CAPBA, CAPFA e CAPRE. Observou-se um comportamento semelhante para os três tipos de asfaltos. O módulo complexo diminui e o ângulo de fase aumenta com o acréscimo da temperatura, porém os valores de módulo diferiram para os três tipos de CAP's.

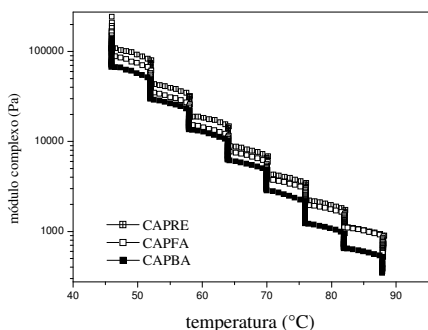


Figura 15: G^* em função da temperatura para o CAPFA, CAPRE e CAPBA.

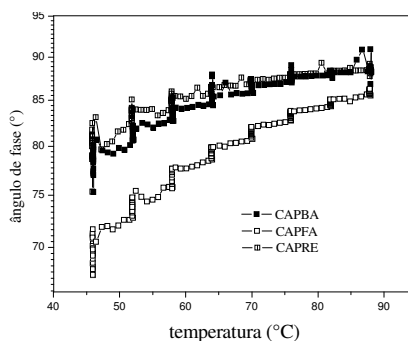


Figura 16: δ em função da temperatura para o CAPFA, CAPRE e CAPBA.

O efeito do SBS no módulo complexo e ângulo de fase está mostrado nas Figuras 17 e 18. Observou-se que o SBS aumenta o módulo complexo e diminui o ângulo de fase conferindo assim ao CAP uma maior rigidez e elasticidade ao ligante asfáltico.

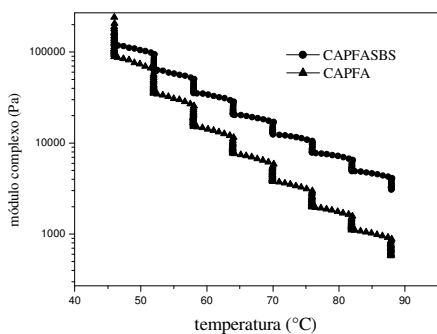


Figura 17: G^* em função da temperatura para o CAPFA e CAPFASBS.

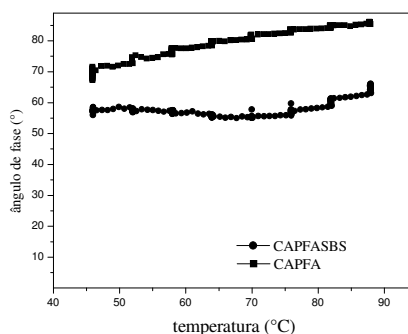


Figura 18: δ em função da temperatura para o CAPFA e CAPFASBS.

4.2.3. Determinação do Grau de Desempenho

Os valores obtidos do grau de desempenho para os CAP's puros e modificados estão mostrados na Tabela 4. As Figuras 19 e 20 mostram a variação do parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ em função da temperatura, antes do RTFOT, para os CAP's puros e CAPFASBS,

respectivamente. O valor considerado foi o menor valor de temperatura, obtido após o RTFOT, baseado no ASTM D6373 (1999). Pela especificação o PG é a temperatura na qual o valor de $G^*/sen\delta$ é superior a 1,0 kPa antes do RTFOT e superior a 2,2 kPa após o RTFOT. Verificou-se que o SBS aumentou o PG dos CAP's evidenciado pela maior temperatura encontrada. O parâmetro $G^*/sen\delta$ é associado à deformação permanente que ocorre em pavimentos asfálticos. Logo, verificou-se que o SBS aumentou a resistência à deformação permanente dos asfaltos estudados.

Os valores de PG da Tabela 4 para CAP puros modificados estão mais altos do que os reportados em literatura (Tonial, 1994; Leni, 1999; TRB, 1993; Blankenship, 1998) que mostram valores de 6 a 12°C abaixo dos encontrados neste trabalho. Vale ressaltar ainda a pouca de precisão deste ensaio (AASHTO TP 5), cuja reprodutibilidade é expressa como a faixa aceitável entre dois resultados de diferentes operadores e diferentes laboratórios como de 29,1 a 31,3% do valor médio. Aplicando este valor aos resultados aqui obtidos verifica-se que a diferença aqui obtida é de 12°C enquanto que o valor máximo aceitável seria de 20°C, ou seja, ainda dentro da reprodutibilidade do método.

Tabela 4: Classificação dos CAP's por grau de desempenho do ligante.

Amostra	CAPFA	CAPFASBS	CAPRE	CAPRESBS	CAPBA
Temperatura, °C antes do RTFOT ($G^*/sen\delta > 1$ kPa)	82	> 88	76	82	76
Temperatura, °C após o RTFOT ($G^*/sen\delta > 2,2$ kPa)	76	82	76	82	70
PG	76	82	76	82	70

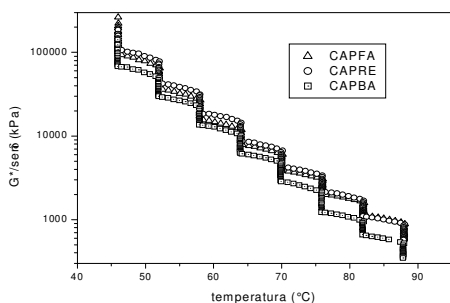


Figura 19: Curvas de $G^*/sen\delta$ em função da temperatura para os CAP's puros.

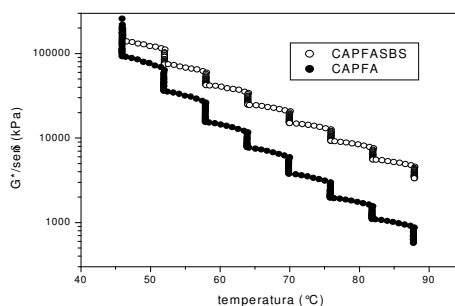


Figura 20: Curvas de $G^*/sen\delta$ em função da temperatura para o CAPFA e CAPFASBS.

4. CONCLUSÕES

Do estudo realizado, constatou-se que diferentes fontes de petróleo produziram CAP's com propriedades reológicas diferenciadas. Fatores como a temperatura, frequência e tensão de cisalhamento influenciaram no módulo de rigidez e na elasticidade dos CAP's. Foi observado que a adição de SBS ao CAP modificou o comportamento reológico dos mesmos. Os CAPFA e CAPRE apresentaram maior resistência à deformação permanente quando modificados por SBS.

Os experimentos utilizados na caracterização reológica dos ligantes, tais como a determinação da região viscoelástica linear, com as varreduras de G^* e δ , a frequência e a temperatura, foram parâmetros bastante elucidativos, na investigação do comportamento reológico dos ligantes estudados assim como em relação à susceptibilidade térmica dos mesmos. Diferentemente do método AASHTO TP5 que visa à determinação da temperatura máxima de resistência à deformação permanente e/ou a temperatura mínima resistente à fadiga, estas técnicas permitem um conhecimento maior dos materiais em estudo em termos de elasticidade, rigidez, susceptibilidade térmica, regiões de linearidade e independência das deformações de cisalhamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Cenpes/Petrobras, pela doação das amostras e os dois primeiros autores agradecem à ANP e ao CNPq pelas respectivas bolsas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Airey, G. D.; B. Rahimzadeh e A. C. Collop (2002) Linear Viscoelastic Limits of Bituminous Binders. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 71, p. 89-115.
- Airey, G. D. (2003) Rheological Properties of Styrene Butadiene Styrene Polymer Modified Road Bitumens. *Fuel*, v.82, p. 1709-1719.
- Anderson, D. A. (1994) Binder Characterisation, Volume 3: Physical Properties. SHRP-A-369, Strategic Highways Research Program, National Research Council, Washington, D. C.
- AASHTO (1993) TP5 - *Método de Teste Padrão para Determinação das Propriedades Reológicas da Liga do Asfalto Utilizando um Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR)*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ASTM (1987) D4402 - *Standard Test Method for Viscosity Determinations of Unfilled Asphalts Using the Brookfield Thermosel Apparatus*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM (1997) D2872 - *Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM (1999) D 6373 - *Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*. American Society for Testing and Materials.
- Bahia, H. U.; W. P. Hislop; H. Zhai e A. Rangel (1998) Classification of Asphalt Binders into Simple and Complex Binders. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 67, p. 1-41.
- Bahia, H. U.; H. Zhai; K. Bonnetti e S. Kose (1999) Non-Linear Viscoelastic and Fatigue Properties of Asphalt Binders. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 68, p. 1-34.
- Bahia, H. U. e D. I. Hanson (2000) *Project NCHRP 9-10*, Asphalt Institute.
- Barnes, H. A.; J. F. Hutton e K. Walters (1989) *An Introduction to Rheology*, Elsevier, Amsterdam.
- Blankenship, P.; A. Myers; A. Clifford; T. Thomas; H. King e G. King (1998) Are All PG 70-22s the Same? Lab Tests on KY I-64 Field Samples. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 67 p. 493.
- Bretas, R. E. S. e M. A. D'Avila (2000) *Reologia de Polímeros Fundidos*. Ed. da UFSCar, São Carlos, São Paulo, Brasil.
- Cheung, C. Y. e D. Cebon (1997a) Deformation Mechanisms of Purê Bitumen. *Journal of Materials in Civil Engineering*, p. 117-129.
- Cheung, C. Y. e D. Cebon (1997b) Experimental Study of Pure Bitumens in Tension, Compression and Shear. *Journal of Rheology*, p. 45-73.
- Cheung, C. Y. e D. Cebon (1997c) Thin Film Deformation Behavior of Power-Law Creeping Materials. *Journal of Engineering Mechanics*, p. 1138-1151.
- Collins, J. H.; M. G. Bouldin; R. Gelles e A. Berker (1991) Improved Performance of Paving Asphalts by Polymer Modification. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 60, p. 43-79.
- Costa, C. A. (2002) O Desenvolvimento do Emprego de Asfaltos Modificados por Polímeros na Região Nordeste do Brasil. *Anais do 16º Encontro de Asfalto, IBP*, Rio de Janeiro, cd-room, IBP00102.
- Goodrich, J. L. (1991) Asphalt Binder Rheology, Asphalt Concrete Rheology and Asphalt Concrete Mix Properties. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 60, p. 80-120.
- Isacsson, U. e X. Lu (1997) Influence of Styrene-Butadiene-Styrene Polymer Modification on Bitumen

- Viscosity, *Fuel*, v. 76, p. 1353 – 1359.
- Isacsson, U. e X. Lu (1998) Chemical and Rheological Evaluation of Aging Properties of SBS Polymer Modified Bitumens, *Fuel*, v. 77, p. 961-972.
- Leite, L. F. M. e I. Tonial (1994) Qualidade dos Cimentos Asfálticos Brasileiros Segundo as Especificações SHRP. Estudos de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímero. *Anais do 12º Encontro de Asfalto, IBP*, Rio de Janeiro, p. 94-119.
- Leite, L. F. M. (1999) Estudos de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímero, *Tese de Doutorado, IMA/UFRJ*, Rio de Janeiro.
- Lucena, M. C. C.; S. A. Soares e J. B. Soares (2003) Efeito da Adição de SBS nas Propriedades Químicas e Reológicas de Asfalto Oriundo de Petróleo Brasileiro. *Anais do 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás*, Rio de Janeiro, p. 160-160.
- Motta, L.M.G.; I.Tonial; Leite, L. F. M. e R. S. Constantino (1996) *Princípios do Projeto e Análise SUPERPAVE de Misturas Asfálticas*. Tradução comentada, IBP.
- Rodrigues, G. F.; M. A. Viana e J. A. G. Vasconcelos (1995) Trecho Experimental/CE: Uma Abordagem da Especificação SHRP para o Nordeste do Brasil. *Anais do IX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, v. 1, p. 109-113.
- SHRP (1994) *Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of SHRP Asphalt Research Program. Strategic Highway Research Program A-410*, National Research Council, Washington, DC.
- Soares, J. B. e F. V. Souza (2002) Verificação do Comportamento Viscoelástico Linear em Misturas Asfálticas. *Anais do 16º Encontro de Asfalto em cd-room, IBP*, Rio de Janeiro, IBP01402.
- Transportation Research Board (1993) *ASPHALT PROPERTIES – Chemical and Physico-Chemical Analysis of Asphalt Cements from SHRP Program*, Materials Reference Library.
- Wen, G.; Y. Zhang; Y. Zhang; K. Sun e Y. Fan (2002) Rheological Characterization of Storage-Stable SBS-Modified Asphalts. *Polymer Testing*, v. 21, p. 295-302.
- Zanzotto L.; D.P. Foley; R.D. Watson e C. Juergens (1989) *On Some Practical Aspects of Using Polymers Asphalts in Hot Mixes*, Proceedings of Canadian Technical Asphalt Association, v. 34, p. 20-40.

⁸Laboratório de Mecânica dos Pavimentos,
Departamento de Engenharia de Transportes, UFC,
Campus do Pici – Bloco 703 s/n CEP 60455-760.
Email: conceicao@det.ufc.br, jsoares@det.ufc.br^{*}, sas@ufc.br, leniml@cenpes.petrobras.com.br