

VISCOSIDADE ROTACIONAL DE LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS DE MESMO GRAU DE DESEMPENHO

Matheus David Inocente Domingos

Thaís Ferreira Pamplona

Adalberto Leandro Faxina

Antonio Carlos Gigante

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

RESUMO

Os objetivos deste trabalho são (a) comparar as viscosidades rotacionais virgens de ligantes asfálticos modificados de mesmo PG, (b) comparar as temperaturas de processamento obtidas por métodos diferentes e (c) avaliar o efeito das temperaturas de processamento adotadas para estas amostras sobre os teores ótimos das misturas dosadas pelo critério do Superpave. Dentre as viscosidades obtidas, as maiores pertencem ao CAP+EVA, ao CAP+borracha e ao CAP+borracha+PPA e as menores, ao CAP puro e ao CAP+PPA. As temperaturas de processamento calculadas pelo método tradicional se mostraram muito elevadas para o CAP+borracha, o CAP+borracha+PPA e o CAP+EVA e, pelo método simplificado, estas temperaturas são de 20 a 45°C menores para a maioria dos ligantes asfálticos. À exceção do CAP puro, do CAP+PPA, do CAP+SBS+PPA e do CAP+EVA+PPA, as temperaturas de processamento da maioria dos ligantes asfálticos foram reduzidas e, mesmo assim, os projetos de dosagem das misturas asfálticas pelo método Superpave foram bem-sucedidos.

ABSTRACT

The objectives of this work are as follows: (a) to compare rotational viscosities of unaged and modified asphalt binders of the same performance grade, (b) to compare mixing and compaction temperatures obtained by different methods and (c) to evaluate the effect of these temperatures on the optimum binder contents of mixes designed according to the Superpave criterion. AC+EVA, AC+rubber and AC+rubber+PPA have the greatest viscosities among the binders studied here, whereas the neat one and AC+PPA have the lower viscosities. Mixing and compaction temperatures were found to be very high for AC+rubber, AC+rubber+PPA and AC+EVA in the conventional method, whereas temperatures from 20 to 45°C lower were found for the majority of the binders in the simple method. Mixing and compaction temperatures were reduced for the majority of the binders with the exception of the neat binder, AC+PPA, AC+SBS+PPA and AC+EVA+PPA. In spite of these reductions, the Superpave mixture design projects were well succeeded.

1. INTRODUÇÃO

A modificação de ligantes asfálticos é adotada como uma maneira de melhorar o desempenho destes materiais em campo, uma vez que o número de veículos nas rodovias, as cargas por eixo dos veículos comerciais e as pressões dos pneus vêm aumentando nos últimos anos (Airey, 2002). Os processos de modificação geralmente aumentam a viscosidade dos ligantes asfálticos e, com isso, as faixas de temperaturas de usinagem e de compactação destes materiais também são geralmente superiores às do material puro. Na especificação Superpave, a viscosidade dos ligantes asfálticos é determinada com o viscosímetro rotacional (Brookfield) e, a fim de propiciar um nível adequado de trabalhabilidade, a norma ASTM D6373 limita a viscosidade do ligante asfáltico virgem em 3,0 Pa.s, medida a 135°C e com *spindle* 21 a 20 rpm. O Regulamento Técnico 03/2005 da ANP também determina o uso do *spindle* 21 a 20 rpm e especifica valores máximos de viscosidade a 135 e a 150°C para as quatro classes de CAP e faixas de viscosidade na temperatura de 177°C.

A análise da viscosidade rotacional de ligantes asfálticos modificados foi realizada em diversos estudos (Airey, 2002; Airey, 2003; Polacco *et al.*, 2004; Tomé *et al.*, 2005; Kalantar *et al.*, 2010;

Cao *et al.*, 2011), nos quais a incorporação de modificadores levou ao aumento da viscosidade. O aumento da viscosidade depende, via de regra, do tipo e da proporção do modificador, bem como da interação entre o modificador e o ligante asfáltico de base. A viscosidade rotacional (Airey, 2003) é geralmente incapaz de quantificar as características reológicas intrínsecas de grupos diferentes de ligantes asfálticos modificados, o mesmo ocorrendo com as propriedades tradicionais como a penetração e o ponto de amolecimento. Para alguns tipos de modificadores como os terpolímeros reativos, estudos (Polacco *et al.*, 2004) mostraram que o tempo de reação entre o modificador e o ligante asfáltico deve ser mantido dentro de um determinado limite, pois, caso este controle não seja realizado, a viscosidade aumentará significativamente e, assim, a retirada do tanque de armazenamento e a utilização do ligante asfáltico modificado em campo serão inviáveis. Tal fenômeno de reação continuada do modificador com o ligante asfáltico também ocorre no processamento do asfalto-borracha (Abdelrahman e Carpenter, 1999) e também conduz ao aumento da viscosidade.

Além de ser usada como propriedade de controle na formulação de ligantes asfálticos modificados, a viscosidade também é empregada na estimativa das temperaturas de usinagem e de compactação da massa asfáltica. Tal estimativa é feita com base em intervalos equidistantes de temperatura, com o propósito de normalizar o efeito da rigidez do ligante asfáltico nas propriedades volumétricas da mistura asfáltica. Estas temperaturas são geralmente indicadas em faixas de 5 a 7°C, com os procedimentos de usinagem e de compactação sendo realizados em temperaturas próximas ao valor médio destas faixas (Asphalt Institute Online, 2003). De acordo com o manual de projeto de misturas asfálticas do Superpave, a temperatura apropriada de usinagem é aquela na qual o ligante asfáltico apresenta uma viscosidade Brookfield de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s, enquanto que a temperatura de compactação é aquela em que o ligante asfáltico apresenta uma viscosidade Brookfield de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s. Estes valores são tradicionalmente aplicados a ligantes asfálticos não-modificados e têm sido utilizados também na determinação das temperaturas de usinagem e de compactação dos materiais modificados.

Além destes limites tradicionais, outras relações também são utilizadas para se estimar as temperaturas de usinagem e de compactação de ligantes asfálticos modificados. No caso do ligante asfalto-borracha moída, por exemplo, a Especificação de Serviço 112/2009 do DNIT menciona que a temperatura de aquecimento deve estar entre 170°C e 180°C e que a temperatura mínima recomendável para a compactação é de 145°C. No caso dos materiais modificados com polímeros, por exemplo, a Especificação de Serviço 385/1999 do DNIT menciona que a temperatura conveniente para aquecimento do material é de 150°C acrescida de 3°C para cada 1% de estireno-butadieno-estireno (SBS) até um limite máximo de 180°C, com a temperatura recomendável para a compactação sendo de 140°C acrescida de 3°C para cada 1% de SBS.

Embora o método tradicional forneça temperaturas razoáveis de usinagem e de compactação para os ligantes asfálticos puros, para os quais foi desenvolvido, o mesmo pode não ocorrer com os ligantes asfálticos modificados. Para estes materiais, os cálculos das temperaturas em que as viscosidades são iguais a $0,17 \pm 0,02$ Pa.s para usinagem e $0,28 \pm 0,03$ Pa.s para compactação podem fornecer valores muito elevados, nos quais o ligante asfáltico não pode ser aquecido por conta de riscos à segurança dos operadores e problemas ambientais (Yildirim *et al.*, 2000). Isto ocorre porque, diferentemente dos

materiais puros, a viscosidade dos ligantes asfálticos modificados depende não apenas da temperatura, mas também da taxa de cisalhamento. Desta maneira, é necessária a compreensão do comportamento pseudoplástico dos ligantes asfálticos modificados no estudo da influência do comportamento reológico destes materiais sobre as temperaturas de usinagem e de compactação (Khatri *et al.*, 2001).

Estudos como os de Yildirim *et al.* (2000) levaram em consideração o efeito da pseudoplasticidade dos ligantes asfálticos modificados sobre as temperaturas de usinagem e de compactação de misturas asfálticas e observou-se que, ao considerar a taxa de cisalhamento sofrida pelo material durante o processo de compactação, as temperaturas de processamento podem ser reduzidas de 10 a 40°C. Em outro estudo, Yildirim *et al.* (2006) compararam as faixas de temperaturas de usinagem e de compactação obtidas pelo método tradicional e as calculadas para uma taxa de cisalhamento mais elevada (500 s^{-1}) e para uma faixa diferente de viscosidades ($0,275 \pm 0,03 \text{ Pa.s}$ para a usinagem e $0,550 \pm 0,06 \text{ Pa.s}$ para a compactação) e concluíram que, em relação aos valores obtidos pelo método tradicional, as temperaturas de processamento diminuíram de 13 a 52°C para os ligantes asfálticos considerados. A adoção de viscosidades mais elevadas para a usinagem e a compactação de muitos ligantes asfálticos modificados é compartilhada por Asphalt Institute Online (2003), o qual atribui esta possibilidade às características peculiares dos materiais modificados.

A determinação das temperaturas de usinagem e de compactação dos ligantes asfálticos também pode ser realizada por meio do reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR). Neste método, conhecido como método Casola, é realizada uma varredura de frequência de 0,001 a 100 rad/s em uma faixa de temperaturas que varia de acordo com o PG do ligante asfáltico, de modo a obter o ângulo de fase de 86°. O cálculo destas temperaturas é feito de acordo com as Equações 1 e 2 (West *et al.*, 2010):

$$TC = 300(\omega)^{-0,012} \quad (1)$$

$$TU = 325(\omega)^{-0,0135} \quad (2)$$

em que: TC: temperatura de compactação [°F];
TU: temperatura de usinagem [°F];
 ω : frequência correspondente ao ângulo de fase de 86° [rad/s].

Em um estudo envolvendo o volume de vazios de misturas asfálticas preparadas no compactador giratório Superpave e a viscosidade de ligantes asfálticos convencionais e modificados, Khatri *et al.* (2001) observaram que as misturas compostas com ligantes asfálticos modificados possuíam volumes de vazios maiores do que as compostas com ligantes asfálticos convencionais. Estes autores correlacionaram o volume de vazios das misturas asfálticas e as viscosidades medidas a diversas taxas de cisalhamento e, a partir dos resultados, concluíram que a variabilidade do volume de vazios é mais bem explicada pela viscosidade medida a taxas de cisalhamento baixas. Segundo os autores, a viscosidade a taxas baixas pode combinar os efeitos da taxa de cisalhamento e da viscosidade sobre a compactação em apenas um indicador e, com seu uso, é possível tornar a determinação das temperaturas de processamento das misturas asfálticas independente do tipo de ligante asfáltico. Para casos em que a determinação das viscosidades dos ligantes asfálticos em taxas de cisalhamento baixas não é possível, o estudo sugere a utilização das faixas de viscosidade de $1,4 \pm 0,1 \text{ Pa.s}$ para a compactação e de $0,75 \pm 0,1 \text{ Pa.s}$ para a usinagem, ambas medidas com o *spindle* 27 e a 20 rpm, como uma simplificação promissora e uma boa aproximação.

Os objetivos deste trabalho são (a) comparar os valores de viscosidade rotacional (Brookfield) virgem de ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho em diversas temperaturas, (b) comparar as temperaturas de usinagem e de compactação destes ligantes asfálticos obtidas pelo método tradicional (materiais newtonianos) e pelo método simplificado proposto por Khatri *et al.* (2001) para ligantes asfálticos pseudoplásticos e (c) avaliar o efeito das temperaturas de usinagem e de compactação adotadas para estes ligantes asfálticos sobre os teores ótimos das misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave.

2. MATERIAIS EMPREGADOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Na produção das amostras, foram utilizados (1) o CAP 50/70, fornecido pela REPLAN-Petrobras e de classificação PG 64-XX; (2) a borracha moída de pneu, fornecida pela empresa Ecija Comércio Exportação e Importação de Produtos Ltda, resultante do processo de trituração de bandas de rodagem de pneus de veículos de passeio; (3) o ácido polifosfórico (PPA) de designação comercial Innovalt E-200, fornecido pela Innophos Inc. dos Estados Unidos; (4) o SBS tipo TR-1101, adquirido da Kraton e fornecido pela Betunel; (5) a borracha de estireno-butadieno (SBR) tipo Solprene 1205, adquirida da Dynasol e fornecida pela Betunel; (5) o etileno acetato de vinila (EVA) tipo HM 728, adquirido da Politen e fornecido pelo Cenpes-Petrobras; (6) o polietileno (PE) tipo UB160-C de baixa densidade, produzido pela Unipar; e (7) o terpolímero Elvaloy tipo 4170, fornecido pela Dupont. As formulações foram escolhidas com o intuito de se obter ligantes asfálticos modificados de classificação PG 76-XX, que corresponde a dois graus acima do PG do CAP. O misturador de baixo cisalhamento utilizado é o da marca Fisatom, modelo 722D, e o de alto cisalhamento é o da marca Silverson, modelo L4R. As formulações dos ligantes asfálticos e as respectivas variáveis de processamento estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1: Formulações dos ligantes asfálticos e variáveis de processamento

Ligante asfáltico	PG	Formulações (% em massa)			Variáveis de processamento			
		CAP	Modificador	PPA	Cisalhamento	Rotação (rpm)	Temperatura (°C)	Tempo (min)
50/70	64-XX	100,0	-	-	-	-	-	-
PPA	76-XX	98,8	-	1,2	baixo	300	130	30
Elvaloy+PPA	76-XX	98,4	1,3	0,3	baixo	300	190	120, PPA aos 60
Borracha	76-XX	86,0	14,0	-	alto	4.000	190	90
Borracha+PPA	76-XX	88,5	11,0	0,5	alto	4.000	190	120, PPA aos 90
SBS	76-XX	95,5	4,5	-	alto	4.000	180	120
SBS+PPA	76-XX	96,5	3,0	0,5	alto	4.000	180	120, PPA aos 60
EVA	76-XX	92,0	8,0	-	baixo	300	180	120
EVA+PPA	76-XX	96,6	3,0	0,4	baixo	300	180	120, PPA aos 90
PE	76-XX	94,0	6,0	-	baixo	440	150	120
PE+PPA	76-XX	96,5	3,0	0,5	baixo	400	150	120, PPA aos 60
SBR	76-XX	94,5	5,5	-	baixo	400	180	120
SBR+PPA	76-XX	96,0	3,5	0,5	baixo	300	180	120, PPA aos 90

O equipamento utilizado foi um viscosímetro Brookfield modelo DVII+Pro, acoplado a um controlador de temperatura Thermosel. Foram ensaiadas réplicas das amostras a fim de controlar a variabilidade dos resultados, sendo as viscosidades finais obtidas como a média aritmética simples dos valores. Foram empregadas as temperaturas de 135, 143, 150, 163 e 177°C e as respectivas velocidades de 10, 15, 20, 30 e 50 rpm. A escolha destas velocidades foi feita com o objetivo de realizar medições dentro dos limites de porcentagem de torque de 10 a 98% estipulados pela ASTM D4402 (2002). O *spindle* utilizado foi o n°. 21 e um conjunto de 10 medições foi realizado em cada temperatura, com as viscosidades finais por temperatura sendo obtidas como a média aritmética simples destes 10 valores.

O cálculo das temperaturas de usinagem e de compactação foi realizado graficamente, com base nas medidas de viscosidade obtidas nas cinco temperaturas de ensaio. No caso das temperaturas obtidas pelo método tradicional, a faixa de viscosidade para usinagem é de 0,15 a 0,19 Pa.s e para compactação é de 0,25 a 0,31 Pa.s. No caso das temperaturas obtidas pelo método simplificado, a faixa de viscosidade para usinagem é de 0,65 a 0,85 Pa.s e para compactação é de 1,3 a 1,5 Pa.s. Para os dois métodos, foi calculada também a temperatura média de cada intervalo a partir das temperaturas extremas. Neste procedimento, as medidas de viscosidades foram feitas com *spindle* 21, sob taxas de cisalhamento diferentes nas diferentes temperaturas, diferindo do procedimento de Khatri *et al.* (2001): *spindle* 27 a 20 rpm, que resulta em uma taxa de cisalhamento de $6,8\text{ s}^{-1}$. Admite-se que, em uma faixa ampla de taxas de cisalhamento, as taxas utilizadas nestes ensaios são próximas ao valor sugerido por Khatri *et al.* (2001).

A dosagem das misturas asfálticas foi realizada de acordo com os critérios da especificação Superpave, empregando 100 giros, e a obtenção dos teores ótimos foi feita admitindo o volume de vazios (V_v) de 4% para os corpos-de-prova. As temperaturas de usinagem (ou mistura) e de compactação foram escolhidas com base nos intervalos de viscosidade obtidos por meio do método tradicional. Em alguns casos, temperaturas menores foram admitidas, uma vez que as indicadas pelo método tradicional são impraticáveis.

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 1 apresenta as viscosidades rotacionais dos ligantes asfálticos a 135°C. O CAP+EVA apresenta a maior viscosidade (2,94 Pa.s), seguido pelo CAP+borracha (2,30 Pa.s), depois pelo CAP+borracha+PPA (1,82 Pa.s) e pelo CAP+Elvaloy+PPA (1,71 Pa.s). O ligante asfáltico puro apresenta a menor viscosidade (0,36 Pa.s), seguido pelo CAP+PPA (0,72 Pa.s) e pelo CAP+SBR+PPA (1,11 Pa.s). Viscosidades praticamente iguais são encontradas entre os CAPs modificados com SBS, PE e PE+PPA (1,3 Pa.s), o mesmo ocorrendo com o CAP+SBR e o CAP+SBR+PPA (1,1 Pa.s). Os ligantes asfálticos modificados com PPA e polímeros apresentam viscosidades rotacionais menores em comparação aos seus correspondentes modificados apenas com polímeros. Estas diferenças são mais elevadas no caso dos CAPs modificados com borracha moída (2,30 e 1,82 Pa.s) e com EVA (2,94 e 1,41 Pa.s), sendo pequenas para os materiais modificados com SBS (1,34 e 1,20 Pa.s), com PE (1,34 e 1,27 Pa.s) e com SBR (1,13 e 1,11 Pa.s).

A Figura 2 apresenta as viscosidades rotacionais a 143°C. Assim como na temperatura de 135°C, o CAP+EVA possui a maior viscosidade rotacional (1,67 Pa.s), seguido pelo CAP+borracha (1,34 Pa.s), depois pelo CAP+borracha+PPA (1,10 Pa.s) e pelo CAP+Elvaloy+PPA (0,92 Pa.s). O CAP 50/70 possui a menor viscosidade (0,24 Pa.s),

seguido pelo CAP+PPA (0,46 Pa.s) e depois pelo CAP+SBR+PPA (0,72 Pa.s). Viscosidades praticamente semelhantes são encontradas nos CAPs modificados com SBS, SBS+PPA, PE+PPA e SBR (0,8 Pa.s), assim como entre os CAPs modificados com Elvaloy+PPA, EVA+PPA e PE (0,9 Pa.s). As diferenças entre as viscosidades rotacionais dos CAPs modificados com PPA e polímeros e seus correspondentes modificados apenas com polímeros dependem do tipo de polímero, sendo mais elevadas para os materiais modificados com EVA (1,67 e 0,90 Pa.s) e borracha moída (1,34 e 1,10 Pa.s) e mais baixas para os materiais modificados com SBS (0,76 e 0,78 Pa.s), com PE (0,88 e 0,79 Pa.s) e com SBR (0,76 e 0,72 Pa.s).

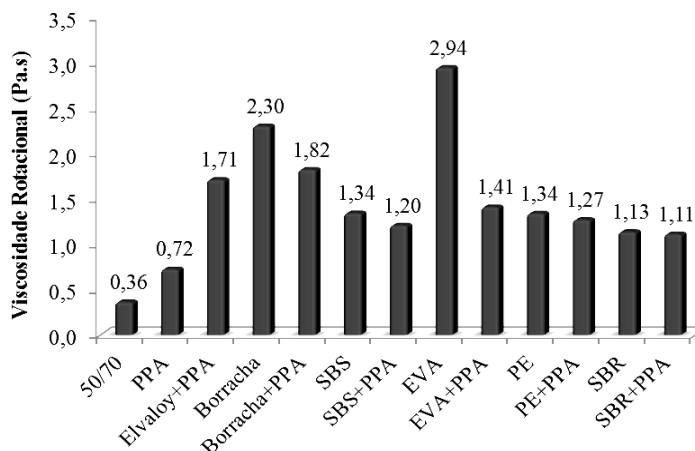


Figura 1: Viscosidades rotacionais a 135°C (10 rpm)

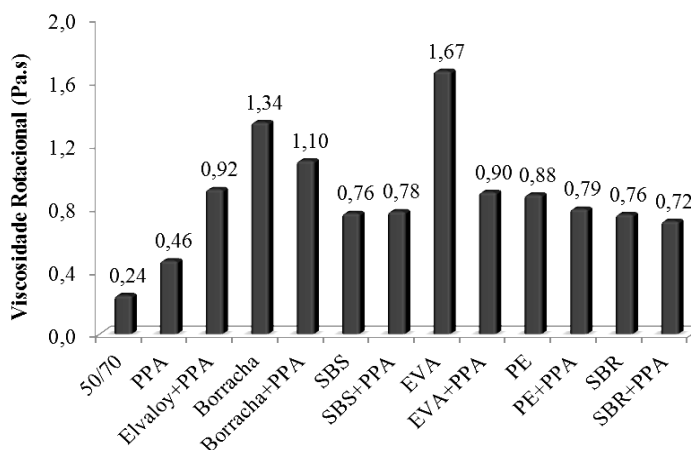


Figura 2: Viscosidades rotacionais a 143°C (15 rpm)

A Figura 3 apresenta as viscosidades rotacionais a 150°C. O CAP+EVA mantém a maior viscosidade (1,19 Pa.s), seguido pelo CAP+borracha (1,00 Pa.s), depois pelo CAP+borracha+PPA (0,77 Pa.s) e pelo CAP+Elvaloy+PPA (0,60 Pa.s). O ligante asfáltico puro mantém a menor viscosidade rotacional (0,18 Pa.s), seguido pelo CAP+PPA (0,33 Pa.s) e depois pelo CAP+SBR+PPA (0,51 Pa.s). Os CAPs modificados com SBS, SBS+PPA, PE+PPA e SBR apresentam viscosidades semelhantes, com valores de aproximadamente 0,55 Pa.s para todos eles. Esta mesma situação ocorre com o CAP+Elvaloy+PPA, o CAP+EVA+PPA e o CAP+PE, para os

quais a viscosidade é de aproximadamente 0,6 Pa.s. A diferença entre as viscosidades rotacionais dos CAPs modificados com PPA e polímeros e seus correspondentes modificados apenas com polímeros é elevada no caso do EVA (1,19 e 0,63 Pa.s) e da borracha moída (1,00 e 0,77 Pa.s), sendo pequena no caso do SBR (0,56 e 0,51 Pa.s) e do PE (0,65 e 0,56 Pa.s) e praticamente nula no caso do SBS (0,57 e 0,58 Pa.s).

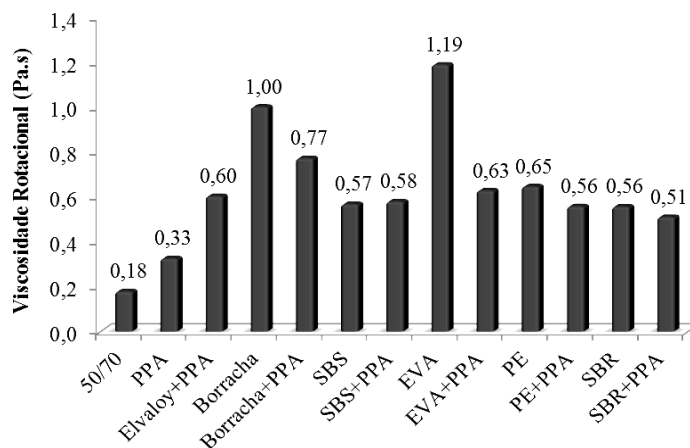


Figura 3: Viscosidades rotacionais a 150°C (20 rpm)

A Figura 4 apresenta as viscosidades rotacionais a 163°C. O CAP+EVA mantém a maior viscosidade (0,69 Pa.s), porém com uma diferença inferior a 0,1 Pa.s para o CAP+borracha (0,60 Pa.s) e inferior a 0,3 Pa.s para o CAP+borracha+PPA (0,47 Pa.s). O CAP 50/70 possui a menor viscosidade rotacional (0,11 Pa.s), seguido pelo CAP+PPA (0,18 Pa.s) e depois pelo CAP+SBR+PPA (0,29 Pa.s). Viscosidades em torno de 0,3 Pa.s são observadas nos CAPs modificados com Elvaloy+PPA, PE+PPA, SBR e SBR+PPA e, da mesma maneira, as viscosidades dos CAPs modificados com SBS, SBS+PPA, EVA+PPA e PE são de aproximadamente 0,4 Pa.s. As diferenças entre as viscosidades rotacionais são mais elevadas no caso dos ligantes asfálticos modificados com EVA (0,69 e 0,36 Pa.s) e com borracha moída de pneus (0,60 e 0,47 Pa.s), sendo mais baixas para os CAPs modificados com SBS (0,36 e 0,35 Pa.s), com SBR (0,33 e 0,29 Pa.s) e com PE (0,38 e 0,32 Pa.s).

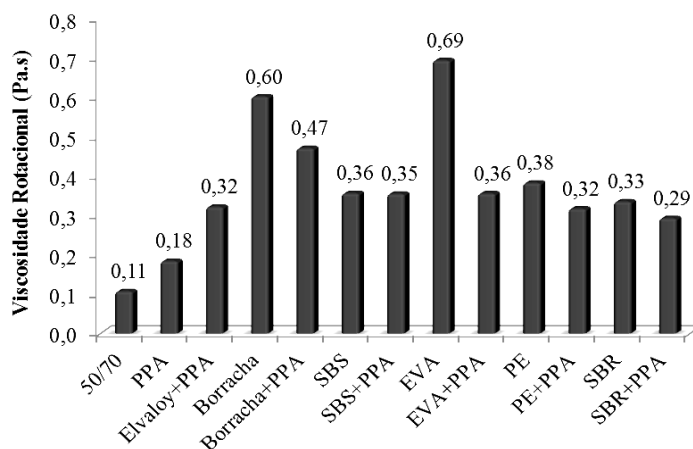


Figura 4: Viscosidades rotacionais a 163°C (30 rpm)

A Figura 5 apresenta as viscosidades rotacionais a 177°C. As variações destas viscosidades são pequenas entre os ligantes asfálticos, sendo de no máximo 0,4 Pa.s. Os CAPs modificados com EVA, borracha e borracha+PPA apresentam as maiores viscosidades (em torno de 0,4 Pa.s), com as menores pertencendo ao CAP 50/70 e ao CAP+PPA (em torno de 0,1 Pa.s). Os ligantes asfálticos modificados com Elvaloy+PPA, SBS, SBS+PPA, EVA+PPA, PE, PE+PPA, SBR e SBR+PPA apresentam viscosidades rotacionais semelhantes, com valores de aproximadamente 0,2 Pa.s para todos eles. A diferença entre as viscosidades do CAP+EVA e do CAP+EVA+PPA é elevada, sendo de aproximadamente 0,2 Pa.s. O mesmo, entretanto, não ocorre com os demais ligantes asfálticos modificados com polímeros e seus correspondentes modificados apenas com polímeros, para os quais as diferenças são de no máximo 0,05 Pa.s.

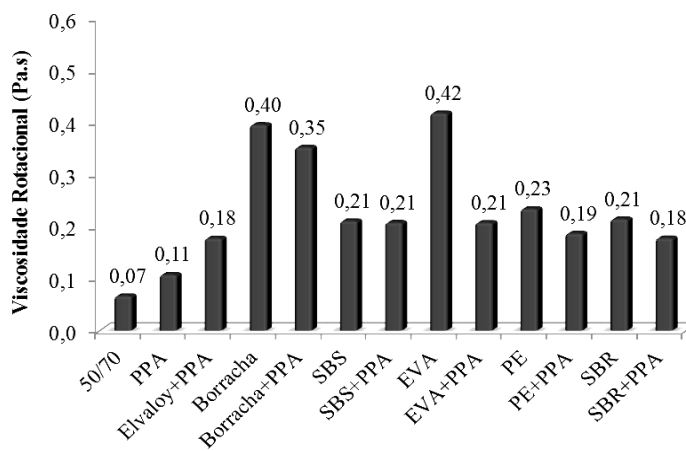


Figura 5: Viscosidades rotacionais a 177°C (50 rpm)

As temperaturas de usinagem e de compactação (TCUs) segundo o critério tradicional são mostradas na Tabela 2. Para o CAP puro, estas temperaturas estão entre 149 e 155°C (média de 152°C) para a usinagem e entre 138 e 142°C (média de 140°C) para a compactação. As temperaturas obtidas para os ligantes asfálticos modificados são maiores que as do material puro, chegando a resultados superiores a 200°C para a usinagem e superiores a 185°C para a compactação no caso do CAP+borracha, do CAP+borracha+PPA e do CAP+EVA. Temperaturas desta ordem são impraticáveis e revelam a inadequação deste critério para a estimativa das temperaturas de usinagem e compactação para formulações desta natureza. O CAP+PPA apresenta temperaturas próximas às do CAP puro, com valores entre 162 e 168°C (média de 165°C) para a usinagem e entre 151 e 156°C (média de 154°C) para a compactação. Os ligantes asfálticos modificados com PPA e polímeros apresentam, na maioria dos casos, TCUs inferiores às dos seus correspondentes modificados apenas com polímeros, com as maiores diferenças sendo observadas entre o CAP+EVA e o CAP+EVA+PPA (19°C na compactação e 20°C na usinagem) e as menores, entre o CAP+SBS e o CAP+SBS+PPA (1°C na compactação e 1°C na usinagem). À exceção do CAP 50/70 e dos CAPs modificados com PPA, borracha, borracha+PPA e EVA, as temperaturas dos demais ligantes asfálticos estão entre 160 e 175°C (média de 168°C) para a compactação e entre 175 e 190°C (média de 183°C) para a usinagem.

Uma comparação dos resultados da Tabela 2 e das Figuras 1 a 5 mostra que o CAP+borracha, o CAP+borracha+PPA e o CAP+EVA possuem as maiores viscosidades rotacionais e, por consequência, as maiores temperaturas de usinagem e de compactação. Para o CAP+borracha e

o CAP+borracha+PPA, os resultados obtidos não satisfazem ao critério da Especificação de Serviço 112/2009 do DNIT, pois, embora as temperaturas de compactação sejam superiores ao mínimo de 145°C para ambos, as temperaturas de usinagem superam o valor máximo permitido de 180°C. Para o CAP+SBS, a temperatura de usinagem calculada de acordo com a Especificação de Serviço 385/1999 do DNIT é de aproximadamente 164°C e a de compactação é de aproximadamente 154°C, ambas inferiores às temperaturas de usinagem e de compactação obtidas para este material e apresentadas na Tabela 2. No caso do CAP+SBS+PPA, para o qual o critério do DNIT sugere as temperaturas de 159°C para a usinagem e de 149°C para a compactação, as temperaturas obtidas são superiores às recomendadas.

Tabela 2: Temperaturas de usinagem e de compactação pelo critério tradicional

Ligante asfáltico	Compactação (°C)		Usinagem (°C)	
	Intervalo	Valor médio	Intervalo	Valor médio
50/70	138 – 142	140	149 – 155	152
PPA	151 – 156	154	162 – 168	165
Elvaloy+PPA	164 – 169	167	175 – 181	178
Borracha	185 – 192	189	201 – 210	206
Borracha+PPA	181 – 192	187	204 – 214	209
SBS	167 – 173	170	180 – 186	183
SBS+PPA	166 – 172	169	179 – 185	182
EVA	185 – 191	188	199 – 205	202
EVA+PPA	166 – 172	169	179 – 185	182
PE	169 – 175	172	183 – 189	186
PE+PPA	164 – 169	167	183 – 189	186
SBR	165 – 171	168	180 – 187	184
SBR+PPA	161 – 167	164	175 – 181	178

A Tabela 3 apresenta as TCUs dos ligantes asfálticos modificados segundo o critério simplificado de Khatri *et al.* (2001), que leva em conta o comportamento pseudoplástico presente em certos ligantes asfálticos. Há que considerar que as temperaturas obtidas por este método são válidas apenas para o CAP+borracha e o CAP+borracha+PPA, pois são os únicos a apresentar comportamento pseudoplástico, e foram obtidas para os demais ligantes asfálticos modificados, de comportamento newtoniano, apenas a título de comparação. As TCUs obtidas por este critério estão entre 120 e 170°C para todos os materiais, com os resultados mais elevados pertencendo ao CAP+EVA, ao CAP+borracha e ao CAP+borracha+PPA. Em termos numéricos, as TCUs obtidas pelo critério simplificado de Khatri *et al.* (2001) são de 20 a 60°C inferiores às obtidas pelo critério tradicional, com as maiores reduções sendo encontradas no CAP+borracha, no CAP+borracha+PPA e no CAP+EVA. De acordo com Khatri *et al.* (2001), é possível trabalhar com viscosidades mais elevadas para os ligantes asfálticos modificados quando a natureza pseudoplástica destes materiais é levada em consideração, o que, como observado na Tabela 3, resulta em temperaturas de processamento mais baixas.

As temperaturas de usinagem e de compactação empregadas nas dosagens das misturas asfálticas foram determinadas segundo os limites de viscosidade do método tradicional e os teores ótimos, obtidos a 100 giros no compactador giratório Superpave para 4% de volume de vazios, estão apresentados na Tabela 4. As temperaturas fornecidas pelo método tradicional foram respeitadas

apenas para o CAP 50/70, o CAP+PPA, o CAP+SBS+PPA e o CAP+EVA+PPA. No caso do CAP+PE+PPA, foi adotada uma temperatura de compactação ligeiramente mais elevada (170 em vez de 167°C) e uma temperatura de usinagem mais baixa (181 em vez de 186°C). No caso do CAP+SBR+PPA, a temperatura de usinagem adotada é 3 graus superior à recomendada (181 em vez de 178°C) e a temperatura de compactação adotada é 6 graus superior à recomendada (170 em vez de 164°C).

Tabela 3: Temperaturas obtidas pelo critério simplificado de Khatri *et al.* (2001)

Ligante asfáltico	Compactação (°C)		Usinagem (°C)	
	Intervalo	Valor médio	Intervalo	Valor médio
50/70	-	-	-	-
PPA	123 – 125	124	132 – 137	135
Elvaloy+PPA	137 – 139	138	144 – 149	147
Borracha	141 – 144	143	154 – 161	158
Borracha+PPA	138 – 140	139	148 – 155	152
SBS	133 – 135	134	141 – 147	144
SBS+PPA	131 – 134	133	141 – 147	144
EVA	145 – 148	147	158 – 165	162
EVA+PPA	134 – 136	135	144 – 150	147
PE	133 – 135	134	144 – 150	147
PE+PPA	132 – 135	134	142 – 147	145
SBR	129 – 132	131	141 – 146	144
SBR+PPA	130 – 132	131	140 – 145	143

Tabela 4: Temperaturas de dosagem e teores ótimos das misturas asfálticas

Ligante asfáltico	Temperaturas (°C)		Teor ótimo (%)
	Compactação	Usinagem	
50/70	140	152	4,37
PPA	154	167	4,66
Elvaloy+PPA	160	180	4,80
Borracha	177	177	5,50
Borracha+PPA	177	177	5,50
SBS	170	178	4,95
SBS+PPA	170	181	4,95
EVA	170	178	4,94
EVA+PPA	170	181	5,00
PE	170	181	4,94
PE+PPA	170	181	4,87
SBR	170	178	4,96
SBR+PPA	170	181	4,92

Para os demais ligantes asfálticos modificados, as temperaturas adotadas são inferiores às recomendadas pelo método tradicional. No caso do CAP+SBS e do CAP+PE, as temperaturas adotadas para usinagem são 5°C inferiores às recomendadas, sendo obedecidas as de compactação. Para o CAP+Elvaloy+PPA, a temperatura recomendada para usinagem foi respeitada, porém a adotada para compactação é 7°C inferior à recomendada. A temperatura de compactação foi

respeitada para o CAP+SBR, porém a adotada para usinagem é 6 graus inferior à recomendada (178 em vez de 184°C). No caso do CAP+EVA, as reduções foram de 18 e 24°C nas temperaturas de compactação e de usinagem, respectivamente. Para o CAP+borracha, estas reduções foram de 12 e 29°C e, para o CAP+borracha+PPA, foram de 10 e 32°C. Mesmo quando temperaturas inferiores às recomendadas foram adotadas, os projetos de dosagem foram bem-sucedidos, reforçando a dúvida sobre a adequação do critério tradicional a certos ligantes asfálticos modificados. Os únicos casos problemáticos foram o CAP+borracha e o CAP+borracha+PPA, em que apenas o aumento da temperatura de compactação não foi suficiente para obter um volume de vazios de 4% a 100 giros. Nestes casos foi necessário aumentar também o teor de ligante asfáltico, como é comum nas dosagens empregando asfaltos-borracha.

Em uma comparação das temperaturas médias de compactação e de usinagem apresentadas nas Tabelas 3 e 4, observa-se que os valores obtidos pelo método simplificado são menores que os adotados na dosagem das misturas asfálticas. Para a maioria dos ligantes asfálticos modificados, o critério simplificado fornece temperaturas de 19 a 38°C menores que as utilizadas na dosagem das misturas asfálticas. Estas diferenças são mais elevadas em ambas as temperaturas no caso do CAP+SBS+PPA, do CAP+PE+PPA, do CAP+SBR e do CAP+SBR+PPA e mais baixas no caso do CAP+EVA. O CAP+borracha e o CAP+borracha+PPA apresentam diferenças de temperaturas entre 19 e 38°C, com os valores maiores (38°C na compactação e 25°C na usinagem) pertencendo ao CAP+borracha+PPA.

4. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi comparar os valores de viscosidade rotacional, em diversas temperaturas, de ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho, além de comparar as temperaturas de usinagem e de compactação obtidas por diferentes métodos com as adotadas em projetos de dosagem. Os resultados mostram como formulações com diversos tipos de modificadores, mesmo tendo a mesma classificação PG, podem apresentar viscosidades tão distintas. O CAP+EVA, o CAP+borracha e o CAP+borracha+PPA apresentam as maiores viscosidades, com as menores pertencendo ao CAP 50/70 e ao CAP+PPA. As diferenças entre as viscosidades do CAP+EVA e do CAP+EVA+PPA são elevadas ao longo de toda a faixa de temperaturas, o mesmo ocorrendo com as viscosidades do CAP+borracha e do CAP+borracha+PPA nas temperaturas de 163°C e inferiores.

Para o método tradicional, os ligantes asfálticos modificados apresentam, em sua maioria, temperaturas de usinagem entre 175 e 190°C e temperaturas de compactação entre 160 e 175°C. O CAP+borracha, o CAP+borracha+PPA e o CAP+EVA apresentam as maiores viscosidades e, por consequência, as maiores temperaturas de processamento. Os ligantes asfálticos modificados com PPA e polímeros apresentam, na maioria dos casos, TCUs inferiores às dos seus correspondentes modificados apenas com polímeros, com as maiores diferenças sendo observadas entre o CAP+EVA e o CAP+EVA+PPA e as menores, entre o CAP+SBS e o CAP+SBS+PPA. As temperaturas obtidas pelo método tradicional para o CAP+borracha e o CAP+borracha+PPA não satisfazem aos requisitos da Especificação de Serviço 112/2009 do DNIT, pois, embora as temperaturas de compactação sejam superiores ao mínimo de 145°C, as de usinagem superam o valor máximo permitido de 180°C. Da mesma maneira, as temperaturas de processamento do CAP+SBS e do CAP+SBS+PPA não satisfazem aos requisitos da Especificação de Serviço 385/99 do DNIT, pois os valores obtidos para a usinagem e a compactação são superiores aos calculados por esta Especificação para ambos os materiais. Já

segundo o método simplificado, as temperaturas de usinagem e de compactação dos ligantes asfálticos modificados são, em sua maioria, de 20 a 45°C menores que as obtidas pelo método tradicional. Os CAPs modificados com borracha, borracha+PPA e EVA sofrem as maiores reduções, com magnitudes iguais ou superiores a 40°C para ambos os processos.

Quanto às temperaturas de usinagem e de compactação adotadas na dosagem das misturas asfálticas, os valores fornecidos pelo método tradicional foram respeitados apenas para o CAP puro, o CAP+PPA, o CAP+SBS+PPA e o CAP+EVA+PPA, sendo as temperaturas adotadas inferiores às recomendadas para a maioria dos ligantes asfálticos. Apesar da redução das temperaturas, que superou os 20°C na usinagem e os 10°C na compactação em alguns ligantes asfálticos, todos os projetos de dosagem foram bem-sucedidos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos ao primeiro autor e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão do Auxílio à Pesquisa Jovem Pesquisador (processo FAPESP n°. 2006/55835-6) ao terceiro autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelrahman, M. A.; Carpenter, S.H. (1999) Mechanism of interaction of asphalt cement with crumb rubber modifier. *Transportation Research Record*, n. 1661, p. 106-113.
- Airey, G. D. (2002) Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, v. 16, issue 8, p. 473-487.
- Airey, G. D. (2003) Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. *Fuel*, v. 82, issue 14, p. 1709-1719.
- American Society for Testing and Materials (2002) *ASTM D4402-02: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*, 3 p.
- Asphalt Institute Online (2003). Laboratory Mixing and Compaction Temperatures. *Asphalt Institute Technical Bulletin*. Disponível em: <http://www.asphaltinstitute.org/public/engineering/PDFs/Superpave/Lab_Mixing_Compaction_Temps.pdf>. Acesso em: 03 jul. 2011.
- Cao, W-D; Liu, S-T; Mao, H-L (2011) Experimental Study on Polyphosphoric Acid (PPA) Modified Asphalt Binders. *Advanced Materials Research*, v.152-153, p. 288-294.
- Kalantar, Z. N.; Mahrez, A.; Karim, M. R. (2010) Properties of Bituminous Binder Modified with Waste Polyethylene Terephthalate. In: MUTRFC – MALAYSIAN UNIVERSITIES TRANSPORTATION RESEARCH FORUM AND CONFERENCE. Universiti Tenaga Nasional, Putrajaya.
- Khatri, A; Bahia, H. U.; Hanson, D. (2001) Mixing and Compaction Temperatures for Modified Binders Using the Superpave Gyrotory Compactor. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 70, p. 368-402.
- Polacco, G.; Stastna, J.; Biondi, D.; Antonelli, F.; Vlachovicova, Z.; Zanzotto, L. (2004) Rheology of asphalts modified with glycidylmethacrylate functionalized polymers. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 280, issue 2, p. 366-373.
- Tomé, L. G. A.; Soares, J. B.; Lima, C. S. (2005) Estudo do Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado pelo Terpolímero de Etileno-butilacrilato-glicidilmetacrilato. In: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE P & D EM PETRÓLEO E GÁS. Salvador.
- West, R. C.; Watson, D. E.; Turner, P. A.; Casola, J. R. (2010) *NCHRP Report 648: Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt*. Transportation Research Board. Washington, D.C.
- Yildirim, Y.; Solaimanian, M.; Kennedy, T. W. (2000) *Research Report Number 1250-5: Mixing and Compaction Temperatures for Hot Mix Asphalt Concrete*. The University of Texas, Austin, TX.
- Yildirim, Y.; Ideker, J.; Hazlett, D. (2006) Evaluation of Viscosity Values for Mixing and Compaction Temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 18, n. 4, p. 545-553.

Endereço dos autores:

Matheus D. I. Domingos, Thais F. Pamplona, Adalberto L. Faxina e Antonio Carlos Gigante

Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13560-970, São Carlos, SP, 005516 33739611, matheusdavid@sc.usp.br, thaispamplona@hotmail.com, alfaxina@sc.usp.br e gigante@sc.usp.br