

# Viscosidade rotacional de ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho

Matheus David Inocente Domingos<sup>1</sup>, Thais Ferreira Pamplona<sup>2</sup>,  
Adalberto Leandro Faxina<sup>3</sup> e Antonio Carlos Gigante<sup>4</sup>

**Resumo:** Os objetivos deste trabalho são (a) comparar as viscosidades rotacionais de ligantes asfálticos de mesmo PG e nas condições virgem e modificada, (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. As maiores viscosidades 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. DOI:10.4237/transportes.v20i2.560.

*Palavras-chave:* viscosidade rotacional, grau de desempenho, ligantes asfálticos modificados, temperaturas de usinagem e compactação, compactador giratório.

**Abstract:** The objectives of this paper are the following: (a) to compare rotational viscosities of unaged and modified asphalt binders with 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 lowest 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.

*Keywords:* rotational viscosity, performance grade, modified asphalt binders, mixing and compaction temperatures, gyratory compactor.

## 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. 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 (ASTM D6373), a viscosidade dos ligantes asfálticos é determinada com o viscosímetro rotacional e, a fim de propiciar um nível adequado de trabalhabilidade, esta especificação limita a viscosidade rotacional do ligante asfáltico virgem em 3,0 Pa.s, medida a 135°C e com *spindle* 21 a 20 rpm. O Regulamento Técnico n.º. 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 CAPs modificados foi realizada em diversos estudos (Airey, 2002; Airey, 2003; Cao *et al.*, 2011; Kalantar *et al.*, 2010; Lucena *et al.*; 2004; Oda e Fernandes Jr., 2001; Polacco *et al.*, 2004; Tomé *et al.*, 2005a; Tomé *et al.*, 2005b), 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, assim como no caso dos terpolímeros reativos, conduz ao aumento da

<sup>1</sup> **Matheus David Inocente Domingos**, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil. (e-mail: matheusdavid@sc.usp.br).

<sup>2</sup> **Thais Ferreira Pamplona**, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil. (e-mail: thaispamplonaa@hotmail.com).

<sup>3</sup> **Adalberto Leandro Faxina**, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil. (e-mail: alfaxina@sc.usp.br).

<sup>4</sup> **Antonio Carlos Gigante**, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil. (e-mail: gigante@sc.usp.br).

Manuscrito recebido em 7/3/2012 e aprovado para publicação em 5/7/2012. Este artigo é parte de TRANSPORTES v. 20, n. 2, 2012. ISSN: 2237-1346 (online). DOI:10.4237/transportes.v20i2.560.

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 (Asphalt Institute, 1995), 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 CAPs puros 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 de cálculo (ASTM D2493) 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 a usinagem e  $0,28 \pm 0,03$  Pa.s para a compactação podem fornecer valores muito elevados, como observado nos estudos de Lucena *et al.* (2004) e Tomé *et al.* (2005a), aos quais o ligante asfáltico não pode ser aquecido por conta de riscos à segurança dos operadores, problemas ambientais e degradação química do material. Isto ocorre porque, diferentemente dos CAPs 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 compactação obtidas pelo método tradicional e as calculadas para uma taxa de cisalhamento mais elevada ( $500 \text{ s}^{-1}$ ) e para uma faixa diferente de viscosidades ( $0,275 \pm 0,03$  Pa.s para a usinagem e  $0,550 \pm 0,06$  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 utilização da viscosidade a cisalhamento zero (ZSV) na determinação das temperaturas de processamento de ligantes asfálticos modificados também acarreta valores menores que os obtidos pelo método tradicional, como observado nos estudos de Bahia *et al.* (2001) e Lucena *et al.* (2004).

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]; e

$\omega$ : frequência correspondente ao ângulo de fase de 86° [rad/s].

Em estudos envolvendo o volume de vazios de misturas asfálticas preparadas no compactador giratório Superpave e a viscosidade de CAPs convencionais e modificados, Bahia *et al.* (2001) e 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 melhor explicada pela viscosidade medida a taxas de cisalhamento baixas. Segundo eles, a viscosidade medida a taxas baixas pode combinar os efeitos da taxa de cisalhamento e da viscosidade em apenas um indicador, o que torna possível a determinação das temperaturas de processamento das misturas asfálticas independente do tipo de CAP. Nos casos em que se dispõe apenas da viscosidade obtida do viscosímetro Brookfield, os estudos realizados por Bahia *et al.* (2001) e Khatri *et al.* (2001) sugerem a utilização de duas faixas de viscosidade como uma simplificação promissora e uma boa aproximação, denominado como método simplificado:  $1,4 \pm 0,1$  Pa.s para a compactação e  $0,75 \pm 0,1$  Pa.s para a usinagem, ambas medidas com o *spindle* 27 e a 20 rpm.

Os objetivos deste trabalho são (a) comparar os valores

de viscosidade rotacional de ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho em diversas temperaturas e na condição virgem, (b) comparar as temperaturas de usinagem e de compactação destes ligantes asfálticos obtidas pelo método tradicional e pelo método simplificado proposto 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 L4RT. As formulações dos ligantes asfálticos e as respectivas variáveis de processamento estão detalhadas na Tabela 1.

O equipamento utilizado para a determinação das viscosidades rotacionais 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. 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.

As temperaturas de usinagem e de compactação foram obtidas graficamente (ASTM D2493), 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 ( $0,17 \pm 0,02$  Pa.s) e para compactação é de 0,25 a 0,31 Pa.s ( $0,28 \pm 0,03$  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 ( $0,75 \pm 0,1$  Pa.s) e para compactação é de 1,3 a 1,5 Pa.s ( $1,4 \pm 0,1$  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 estabelecido para o método simplificado: *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 de  $6,8 \text{ s}^{-1}$ .

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 e de compactação foram escolhidas com base nos intervalos de viscosidade obtidos por meio do método tradicional. Em alguns casos, temperaturas menores foram admitidas porque as indicadas pelo método tradicional não são recomendadas para utilização em campo.

## 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

Tabela 1. Formulações dos ligantes asfálticos e variáveis de processamento

Ligante asfáltico	Formulações (% em massa)				Variáveis de processamento			
	PG	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

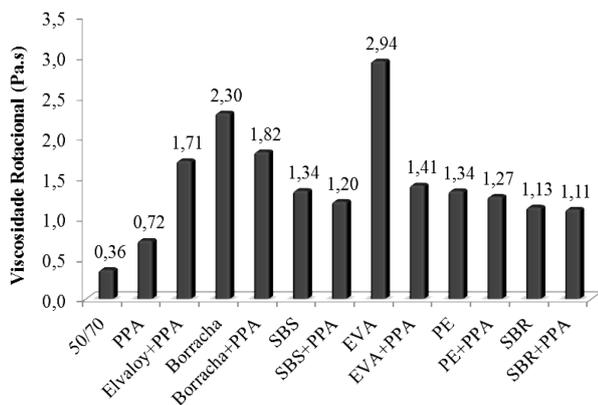


Figura 1. Viscosidades rotacionais a 135 °C (10 rpm)

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). As formulações CAP+modificador+PPA apresentam viscosidades rotacionais menores em comparação às suas formulações correspondentes CAP+modificador. 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 ligantes asfálticos 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 das formulações CAP+modificador+PPA e suas correspondentes CAP+modificador dependem do tipo de polímero, sendo mais elevadas para os materiais

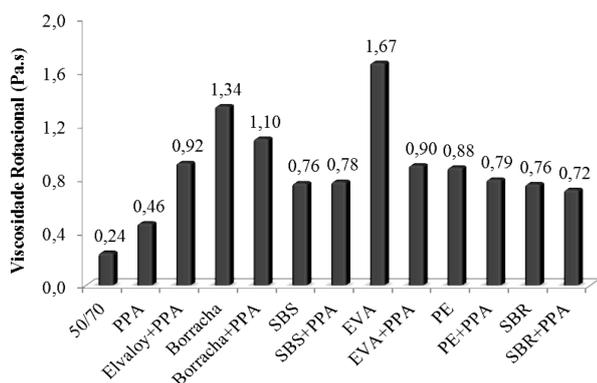


Figura 2. Viscosidades rotacionais a 143 °C (15 rpm)

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).

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 das formulações CAP+modificador+PPA e das formulações correspondentes CAP+modificador 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).

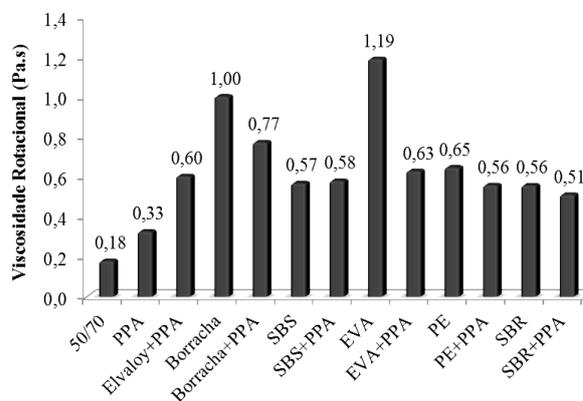


Figura 3. Viscosidades rotacionais a 150 °C (20 rpm)

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).

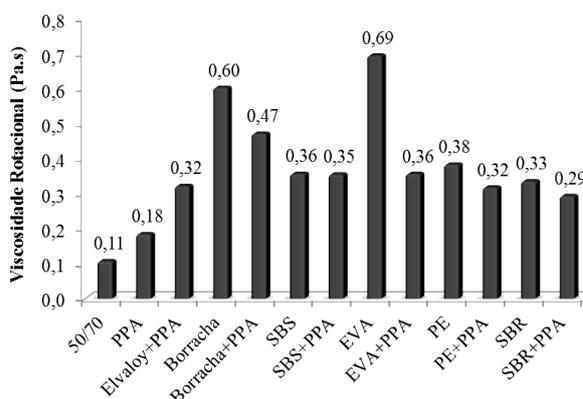


Figura 4. Viscosidades rotacionais a 163 °C (30 rpm)

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 ligantes asfálticos 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 ligantes asfálticos 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). Estas diferenças entre um e outro ligante asfáltico modificado se devem à presença ou ausência do PPA nas formulações e à redução do teor de modificador nas formulações com PPA.

A Figura 5 apresenta as viscosidades rotacionais à temperatura de 177°C. Estas viscosidades estão situadas em um intervalo relativamente pequeno de valores, variando entre 0,07 Pa.s para o CAP puro e 0,42 Pa.s para o CAP+EVA. Os ligantes asfálticos 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 as demais formulações CAP+modificador+PPA e suas

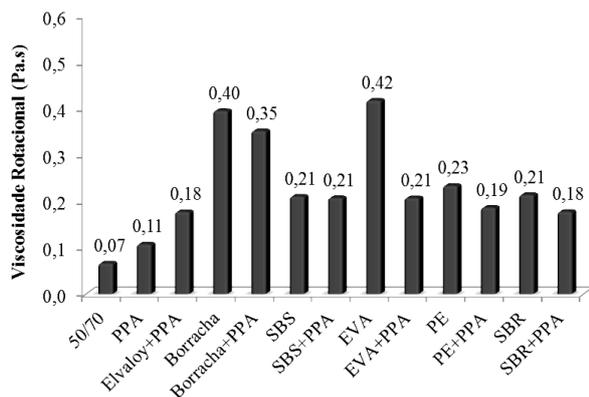


Figura 5. Viscosidades rotacionais a 177 °C (50 rpm)

formulações correspondentes CAP+modificador, para as quais as diferenças são de no máximo 0,05 Pa.s.

As temperaturas de usinagem e de compactação (TUCs) 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 médias de 13 a 14°C superiores 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. As formulações CAP+modificador+PPA apresentam, na maioria dos casos, TUCs inferiores às formulações correspondentes CAP+modificador, 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 para a compactação e entre 175 e 190°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

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

**Tabela 3.** Temperaturas obtidas pelo critério simplificado

<b>Ligante asfáltico</b>	<b>Compactação (°C)</b>		<b>Usinagem (°C)</b>	
	<i>Intervalo</i>	<i>Valor médio</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Valor médio</i>
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

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: 182°C para a usinagem e 169°C para a compactação.

A Tabela 3 apresenta as temperaturas de usinagem e de compactação dos ligantes asfálticos modificados segundo o critério simplificado. Este critério leva em consideração a dependência da viscosidade dos ligantes asfálticos modificados à taxa de cisalhamento e, assim, estabelece faixas mais elevadas de viscosidade rotacional no cálculo das temperaturas de processamento. É importante ressaltar que as temperaturas obtidas pelo critério simplificado 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 TUCs estão entre 120 e 170°C para todos os materiais, com os resultados mais elevados pertencendo ao CAP+EVA (147°C para a compactação e 162°C para a usinagem), ao CAP+borracha (143°C para a compactação e 158°C para a usinagem) e ao CAP+borracha+PPA (139°C para a compactação e 152°C para a usinagem). As TUCs obtidas pelo critério simplificado são de 20 a 60°C inferiores às obtidas pelo critério tradicional, sendo que as maiores

reduções – maiores diferenças entre os resultados – são encontradas no CAP+borracha, no CAP+borracha+PPA e no CAP+EVA. De acordo com Bahia *et al.* (2001) e 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 TUCs 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. Para alguns ligantes asfálticos, as temperaturas utilizadas nos projetos de dosagem sofreram aumentos ou reduções em relação aos valores obtidos pelo método tradicional, com o intuito de obter o volume de vazios desejado após os 100 giros. O processo de obtenção das temperaturas apresentadas na Tabela 4 foi do tipo tentativa-e-erro, ou seja, diversos valores foram testados até que os requisitos de dosagem fossem atendidos. 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 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

**Tabela 4.** Temperaturas de dosagem e teores ótimos das misturas asfálticas

<b>Ligante asfáltico</b>	<b>Temperaturas (°C)</b>			<b>Teor ótimo (%)</b>
	<i>Compactação</i>	<i>Usinagem</i>		
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

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).

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°C 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 atenderam os requisitos volumétricos da especificação Superpave, 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 processamento 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 os ligantes asfálticos modificados, o critério simplificado fornece temperaturas de 10 a 40°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 e do CAP+Elvaloy+PPA. O CAP+borracha e o CAP+borracha+PPA apresentam diferenças de temperaturas entre 19 e 38°C, sendo que os valores maiores (38°C na compactação e 25°C na usinagem) pertencem 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 em temperaturas altas, além de comparar as temperaturas de processamento 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 todo o espectro de temperaturas, o mesmo ocorrendo com as viscosidades do CAP+borracha e do

CAP+borracha+PPA nas temperaturas de até 163°C.

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. As formulações CAP+modificador+PPA apresentam, na maioria dos casos, TUCs inferiores às formulações correspondentes CAP+modificador, 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 a todos os requisitos da Especificação de Serviço 112/2009 do DNIT, pois as temperaturas 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 os 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 TUCs são de 20 a 45°C menores que as obtidas pelo método tradicional para a maioria dos ligantes asfálticos modificados. 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.

Os projetos de dosagem das misturas asfálticas foram realizados tendo como objetivo um volume de vazios de 4% após 100 giros no compactador giratório do Superpave. Os teores ótimos de ligante asfáltico estão, à exceção das misturas asfálticas produzidas com o CAP+borracha e o CAP+borracha+PPA, entre 4,4 e 5,0%. O aumento do teor de ligante asfáltico para as misturas asfálticas produzidas com asfalto-borracha foi considerado porque o simples aumento da temperatura de compactação não foi suficiente para atender aos requisitos de dosagem, como é comum neste tipo de mistura asfáltica. Quanto às temperaturas de processamento, 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 atenderam os requisitos volumétricos da especificação Superpave. Esta observação reforça a conclusão de que o método tradicional apresenta falhas na sua aplicabilidade aos ligantes asfálticos modificados e que, para tais materiais, os cálculos das temperaturas ideais de processamento devem considerar outros fatores que não apenas uma faixa específica de valores de viscosidade.

#### 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.º. 2006/55835-6) ao terceiro autor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelrahman, M. A. e S. H. Carpenter (1999) Mechanism of Interaction of Asphalt Cement with Crumb Rubber Modifier. *Transportation Research Record*, n. 1661, p. 106–113. DOI: 10.3141/1661-15.
- ANP (2005) *Regulamento Técnico ANP No. 03/2005: Cimentos Asfálticos de Petróleo*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Brasília.
- Airey, G. D (2002) Rheological Evaluation of Ethylene Vinyl Acetate Polymer Modified Bitumens. *Construction and Building Materials*, v. 16, n. 8, p. 473–487. DOI:10.1016/S0950-0618(02)00103-4.
- Airey, G. D (2003) Rheological Properties of Styrene Butadiene Styrene Polymer Modified Road Bitumens. *Fuel*, v. 82, n. 14, p. 1709–1719. DOI: 10.1016/S0016-2361(03)00146-7.
- ASTM (2001) *ASTM D2493-01: Standard Viscosity-Temperature Chart for Asphalts*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken. DOI:10.1520/D2493-01.
- ASTM (2002) *ASTM D4402-02: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken. DOI:10.1520/D4402-02.
- ASTM (2007) *ASTM D6373-07: Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken. DOI:10.1520/D6373-07E01.
- Asphalt Institute (1995). *Superpave Level 1 Mix Design*. Asphalt Institute Superpave Series n. 2 (SP-2). Lexington, KY.
- 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](http://www.asphaltinstitute.org/public/engineering/PDFs/Superpave/Lab_Mixing_Compaction_Temps.pdf)> (Acesso em 03/07/2011).
- Bahia, H. U.; D. I. Hanson; M. Zeng; M. Zhai; M. A. Khatri e R. M. Anderson (2001) *NCHRP Report 459: Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design*. Transportation Research Board. Washington, DC.
- Cao, W-D; S-T Liu e H-L Mao (2011) Experimental Study on Polyphosphoric Acid (PPA) Modified Asphalt Binders. *Advanced Materials Research*, v. 152–153, p. 288–294. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.152-153.288.
- DNIT (1999) *DNIT-ES 385/99: Pavimentação – Concreto Asfáltico com Asfalto Polímero*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT (2009) *DNIT 112/2009-ES: Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico com Asfalto-borracha, via Úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de Serviço*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- Kalantar, Z. N.; A. Mahrez e M. R. Karim (2010) Properties of Bituminous Binder Modified with Waste Polyethylene Terephthalate. *Proceeding of Malaysian Universities Transportation Research Forum and Conferences*, Universiti Tenaga Nasional, Putrajaya, p. 333–344.
- Khatri, A; H. U. Bahia e D. Hanson (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.
- Lucena, M. C. C.; S. A. Soares; J. B. Soares e L. M. Leite (2004) Uso da Viscosidade "Zero Shear" na Obtenção da Temperatura de Compactação e Usinagem de Asfaltos Modificados por Polímeros. *17o. Encontro de Asfalto - Trabalhos Técnicos*, IBP/Comissão de Asfalto, Rio de Janeiro, p. 191–197.
- Oda, S. e J. L. Fernandes Jr (2001) Borracha de Pneu como Modificador de Cimentos Asfálticos para Uso em Obras de Pavimentação. *Acta Scientiarum*, v. 23, n. 6, p. 1589–1599.
- Polacco, G.; J. Stastna; D. Biondi; F. Antonelli; Z. Vlachovicova e L. Zanzotto (2004) Rheology of Asphalts Modified with Glycidyl-methacrylate Functionalized Polymers. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 280, n. 2, p. 366–373. DOI:10.1016/j.jcis.2004.08.043.
- Tomé, L. G. A.; C. S. Lima; J. B. Soares; M. C. C. Lucena e A. E. V. Alencar (2005a) Influência do Elvaloy na Modificação de Cimentos Asfálticos Oriundos de Petróleos Brasileiros. *Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2005*, ANPET, Rio de Janeiro, v. 2, p. 1307–1316.
- Tomé, L. G. A.; J. B. Soares e C. S. Lima (2005b) Estudo do Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado pelo Terpolímero de Etileno-butilacrilato-glicidilmetacrilato. *Anais do 3º Congresso Brasileiro de P & D em Petróleo e Gás*, IBP, Salvador.
- West, R. C.; D. E. Watson; P. A. Turner e J. R. Casola (2010) *NCHRP Report 648: Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt*. Transportation Research Board. Washington, DC.
- Yildirim, Y.; M. Solaimanian e T. W. Kennedy (2000) *Research Report Number 1250-5: Mixing and Compaction Temperatures for Hot Mix Asphalt Concrete*. The University of Texas, Austin, TX.
- Yildirim, Y.; J. Ideker e D. Hazlett (2006) Evaluation of Viscosity Values for Mixing and Compaction Temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 18, n. 4, p. 545–553. DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:4(545).