

19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



## 25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

### AVALIAÇÃO DA FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS: UMA ABORDAGEM BASEADA EM ÍNDICES REOLÓGICOS

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

*Alexis Jair Enríquez-León<sup>1</sup>; Marcos Lamha Rocha<sup>1</sup>; Patrícia Hennig Osmari<sup>2</sup>; Leni Leite<sup>1</sup>;  
Larissa Montagner de Barros<sup>3</sup>; Francisco Thiago Sacramento Aragão<sup>1</sup> & Luis Alberto  
Herrmann do Nascimento<sup>4</sup>*

#### RESUMO

O fenômeno da fadiga em pavimentos asfálticos refere-se à deterioração progressiva devido ao acúmulo de danos causados pelas cargas cíclicas do tráfego de veículos e do clima. No Brasil, os pavimentos são predominantemente flexíveis, sujeitos a desafios de aumento de carga do tráfego e variações de temperatura. O projeto do *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP 09-59) propôs melhorias nas avaliações da resposta à fadiga do ligante, como a consideração dos parâmetros Glover-Rowe (GRP) e R. Pesquisadores têm correlacionado o comportamento reológico dos ligantes com o desempenho das misturas asfálticas. O presente estudo avalia e correlaciona índices reológicos de ligantes não modificados e modificados por polímeros com o comportamento à fadiga das misturas. Foram preparadas oito misturas asfálticas com diferentes ligantes e agregados. Os ligantes foram caracterizados reologicamente com o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) no domínio de linearidade do comportamento viscoelástico e também pelo ensaio *Linear Amplitude Sweep* (LAS). As misturas foram avaliadas por ensaios de módulo dinâmico e de fadiga por tração direta uniaxial. Os resultados mostraram correlações entre os índices reológicos dos ligantes (parâmetros GR, R,  $\Delta T_c$  e  $|G^*| \cdot \text{sen} \delta$ , este último da especificação AASHTO M320) e o desempenho à fadiga das misturas. As correlações obtidas fornecem informações valiosas para o desenvolvimento de procedimentos ou propostas de especificações mais efetivas para a seleção de materiais resistentes ao dano por fadiga.

**PALAVRAS-CHAVE:** índices reológicos; ligante asfáltico; mistura asfáltica; fadiga.

#### ABSTRACT

The phenomenon of fatigue in asphalt pavements refers to the progressive deterioration due to the accumulation of damage caused by the cyclic loads of traffic and climate. In Brazil, pavements are predominantly flexible, subjected to challenges related to the increasing traffic loads and temperature variations. The National Cooperative Highway Research Program (NCHRP 09-59) project proposed improvements in the binder fatigue response evaluations, such as the consideration of the Glover-Rowe parameter (GRP) and R-value. Researchers have correlated the rheological behavior of binders with the performance of asphalt mixtures. The present study evaluates and correlates rheological indices of unmodified and polymer-modified binders with the fatigue behavior of mixtures. Eight asphalt mixtures were produced with different binders and aggregates. The binders were rheologically characterized with the dynamic shear rheometer (DSR) in the linear viscoelasticity (LVE) range and the Linear Amplitude Sweep (LAS) test. Dynamic modulus tests and uniaxial direct tension fatigue tests were performed to characterize the mixtures. The results showed correlations between the rheological indices of the binders (GR, R-value,  $\Delta T_c$ , and  $|G^*| \cdot \text{sen} \delta$ , the latter being part of AASHTO M320) and the fatigue performance of the mixtures. The correlations obtained provide valuable information for developing procedures or proposals for more effective specifications for the selection of materials resistant to fatigue cracking.

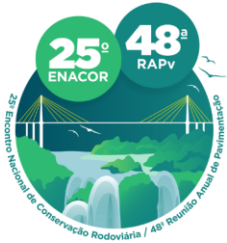
**KEY WORDS:** rheological indices, asphalt binder, asphalt mixture, fatigue.

<sup>1</sup> Programa de Engenharia Civil, PEC/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, aenriquez.eng@gmail.com; marcoslr94@gmail.com; lenimathias@coc.ufrj.br; fthiago@coc.ufrj.br

<sup>2</sup> Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP, Universidade de São Paulo, patriciahosmari@usp.br

<sup>3</sup> Strutura Asfaltos, larissa\_montagner@hotmail.com

<sup>4</sup> CENPES/PETROBRAS, luisnascimento@petrobras.com.br



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



## INTRODUÇÃO

O fenômeno da fadiga nas misturas asfálticas aborda o desgaste incremental do pavimento asfáltico como resultado do acúmulo de danos causados pela ação de cargas cíclicas provenientes do tráfego de veículos. Nas rodovias brasileiras, os pavimentos são predominantemente do tipo flexível submetidos a desafios com o aumento da carga, do volume de tráfego e de variações de temperatura. Esses fatores contribuem para o aparecimento precoce de defeitos, como fadiga e deformação permanente, impactando a durabilidade e a vida útil do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Para uma melhor compreensão da fadiga nas misturas asfálticas, é necessário analisar os fatores que influenciam esse fenômeno. Dentre eles, destacam-se: a rigidez do ligante asfáltico, o teor de ligante, a granulometria dos agregados, o volume de vazios, a temperatura, a taxa de carregamento aplicada, entre outros. A presença de umidade, a qualidade dos materiais utilizados e o envelhecimento do pavimento também desempenham um papel crucial na fadiga (ANDERSON; CHRISTENSEN; BAHIA, 1991; ANDERSON; KENNEDY, 1993).

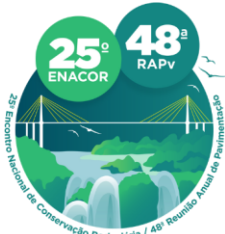
Os ligantes asfálticos desempenham um papel fundamental na durabilidade e no desempenho das misturas asfálticas. Por isso, é necessário conhecer as suas propriedades reológicas para a construção de pavimentos mais duráveis e resistentes. Logo, há o esforço contínuo em desenvolver procedimentos de ensaios e de avaliação do comportamento que sejam efetivos e que possam correlacionar a resistência à fadiga dos ligantes asfálticos com a das misturas.

Assim, foi desenvolvido, nos anos 1990, o programa *Strategic Highway Research Program* (SHRP), visando os desafios relacionados à segurança, renovação, confiabilidade e capacidade das rodovias decorrendo da utilização do reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) para a avaliação de parâmetros de viscoelasticidade linear (*linear viscoelasticity*, LVE, em inglês) como indicadores da resistência à fadiga do ligante (ANDERSON; KENNEDY, 1993). Foi definido o parâmetro  $|G^*|.sen\delta$  para ser usado no método *Superpave* de classificação como um indicador da resistência à fadiga do ligante, determinado em uma frequência de 10 rad/s, em temperatura igual à média entre o grau médio dos PGs alto e baixo mais 4°C e em uma amplitude de deformação de 1%. Estabeleceu-se um valor máximo de 5.000 kPa (AASHTO M320, 2017).

No entanto, posteriormente, constatou-se que esse parâmetro apresenta muitas limitações na avaliação do dano real dos ligantes asfálticos, pois não se relaciona bem com o acúmulo de danos por fadiga das misturas asfálticas (DEACON *et al.*, 1997; BAHIA *et al.*, 2001). Recentemente, o projeto do *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP 09-59) publicou, em 2022, o relatório *Relationships Between the Fatigue Properties of Asphalt Binders and the Fatigue Performance of Asphalt Mixtures*, onde foram propostas melhorias e novas avaliações da resposta à fadiga do ligante asfáltico, com parâmetros alternativos de LVE e o ensaio *Linear Amplitude Sweep* (LAS). Essas melhorias têm como objetivo aumentar a durabilidade e a resistência ao trincamento das misturas asfálticas submetidas a carregamentos repetitivos.

O NCHRP 09-59 propôs o parâmetro Glover-Rowe (GRP),  $|G^*|.(\cos\delta)^2/\sin\delta$ , como alternativa para o parâmetro original de fadiga do *Superpave*,  $|G^*|.sen\delta$ , incluindo uma nova definição de temperatura para o ensaio de fadiga visando um melhor correlação climática. O relatório também recomendou que o valor R do modelo Christensen-Anderson seja utilizado como um preditor da resistência à fadiga, sendo este obtido do reômetro de flexão em viga (*bending beam rheometer*, BBR, em inglês). Foram estabelecidos limites para esses parâmetros, que ainda devem ser considerados provisórios, uma vez que os valores finais necessitarão de dados e validações adicionais.

Diferentes estudos vêm incorporando análises entre o comportamento reológico dos ligantes e seu efeito no desempenho das misturas asfálticas (BARROS *et al.*, 2022; ZEIADA *et al.*, 2022;



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



OGBO *et al.*, 2019; GOOSEN; JENKINS, 2023). Zhang, Sias e Dave (2020) utilizaram uma geometria de 4 mm no DSR para calcular o GR e o  $\Delta T_c$  avaliando as propriedades de fadiga do ligante. Para as misturas, foi utilizado o parâmetro de redução média da pseudo-rigidez ao longo do ensaio até o momento da ruptura ( $D^R$ ), obtendo fortes correlações. Leite, Osmari e Aragão (2022) exploraram diferentes índices reológicos considerando o envelhecimento do material e encontraram relações promissoras a nível de ligantes sobre os efeitos da fadiga e da deformação permanente. Foi avaliada a proposta de temperatura para ensaios de fadiga do NCHRP 09-59 (2022) para aproximadamente 40 ligantes, verificando as variações dos parâmetros LVE, os limites para o GRP e o valor R (YANG; CASTORENA; UNDERWOOD, 2022).

Com a constante preposição de novos indicadores da resistência à fadiga do ligante asfáltico, e conseqüentemente a resposta a esse fenômeno na mistura asfáltica, este estudo avalia a correlação de índices reológicos de ligantes não modificados e modificados por polímeros com resultados do comportamento à fadiga de misturas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Na pesquisa, foram fabricadas oito misturas asfálticas, sendo um ligante diferente para cada mistura. Os agregados utilizados foram do tipo gnaiss, gnaiss migmatítico e basalto, de diferentes estados brasileiros. Foram analisados oito ligantes, de diferentes regiões do país, separados em dois grupos: não modificados (A, B, C, D, E e F) e modificados por polímero (G e H). Os Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAPs) foram do tipo 30/45 (A, B, C, D) e 50/70 (E e F). Para o caso dos ligantes modificados por polímero, foi selecionado um 65/90-E, denominado G e um asfalto altamente modificado por polímero (*Highly Modified Asphalt*, HiMA), denominado H. A Tabela 1 apresenta o resumo dos materiais com a classificação PG do *Superpave* dos ligantes, segundo a norma AASHTO M332 (2020).

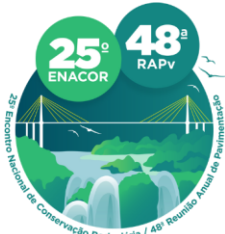
Tabela 1. Informações dos materiais utilizados nas misturas asfálticas.

Mistura	Granulometria		Agregado		Ligante asfáltico		
	ID	TMN (mm)	Tipo	ID	Classe	Tipo	Grau PG*
M-A	1		Gnaiss	A	30/45		70S-16
M-B	2	12,5	Gnaiss migmatítico	B	30/45		64-16**
M-C	3	19,0	Basalto	C	30/45	Não modificado	70S-16
M-D	4	12,5	Gnaiss	D	30/45		70S-16
M-E	5	19,0		E	50/70		64S-16
M-F	2	12,5	Gnaiss migmatítico	F	50/70		64S-22
M-G	3	19,0	Basalto	G	65/90-E	Modificado por polímero	70E-22
M-H	3			H	HiMA		76E-22

Nota\*: o ensaio de MSCR para determinação do nível de tráfego foi realizado a 64°C, baseado no PG mais encontrado nos mapas PG do Brasil (CUNHA *et al.*, 2007; FACCIN *et al.*, 2021).

Nota\*\*: o ligante B não atingiu os critérios mínimos do nível de tráfego S para 64°C.

Para a fabricação de amostras das misturas asfálticas, foi utilizado um compactador giratório *Superpave* (CGS) eletropneumático. Para determinar o teor de ligante de projeto (TP), foram preparadas amostras com TPs variando entre 4% e 6%. Para sete misturas, fixou-se o volume de vazios (Vv) em 4%, segundo a recomendação da metodologia *Superpave*. Para a mistura (M-A),



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



proveniente de um estudo adicional, um  $V_v$  de 3% foi avaliado. A Tabela 2 mostra os parâmetros volumétricos  $V_v$ , TP, vazios nos agregados minerais (VAM) e relação betume vazios (RBV).

Tabela 2. Parâmetros volumétricos das misturas.

Mistura ID	M-A	M-B	M-C	M-D	M-E	M-F	M-G	M-H	Critério
$V_v$	3,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	entre 3% e 5%
TP	5,0	5,2	4,3	5,3	4,3	5,2	4,3	4,3	-
VAM	13,2	14,4	13,7	15,0	13,7	14,4	13,7	15,0	mín. 13%
RBV	78,0	72,0	72,5	74,4	78,3	72,0	74,8	74,3	entre 75% e 82%

Foram selecionadas cinco granulometrias para as misturas com tamanhos máximos nominais (TMNs) entre 12,5 mm e 19,0 mm. A dosagem foi realizada de acordo com a metodologia *Superpave*. Como observado na Figura 1, as granulometrias adotadas foram enquadradas entre os limites dos pontos de controle do *Superpave* e entre os limites estabelecidos pela Faixa C (DNIT 031 - ES, 2006).

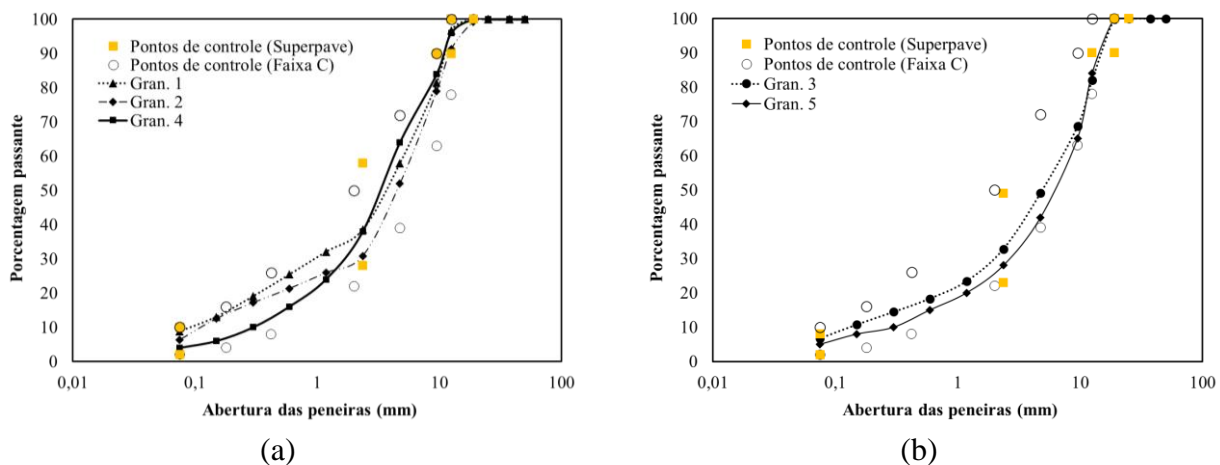


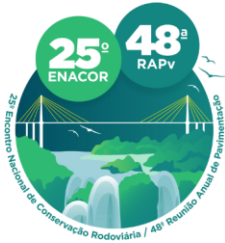
Figura 1. Curvas granulométricas estudadas segundo seu TMN de: a) 12,5 mm e 19,0 mm.

### Reologia dos ligantes asfálticos

Os asfaltos foram ensaiados no reômetro de cisalhamento dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer*, DSR, em inglês), conforme a norma ASTM D7175 (2015), considerando as condições virgem, envelhecidos em curto prazo em estufa de filme fino rotativo (*Rolling Thin Film Oven Test*, RTFOT, em inglês), segundo a ASTM D2872 (2019) e envelhecidos a longo prazo no RTFOT e no vaso de envelhecimento sob pressão (*Pressure Aging Vessel*, PAV, em inglês), segundo a ASTM D6521 (2019), condição denominada no trabalho de PAV.

Diferentes parâmetros LVE foram calculadas, incluindo: i) parâmetro Glover-Rowe, segundo o NCHRP 09-59 (2022), denominado GRP, ii) parâmetro Glover-Rowe original (15°C e 0,005 rad/s), GR, iii) valor R, proveniente do BBR, chamado de R (9-59), iv) valor R, obtido da curva mestra, R e v)  $\Delta T_c$ .

Para tal finalidade, inicialmente foram realizados ensaios de varredura de deformação para identificar a faixa de deformação no regime viscoelástico linear do material. Para a construção de curvas mestras, foram realizados ensaios de varredura de frequência nas temperaturas de 5°C, 15°C, 25°C, 35°C, 45°C, 55°C e 65°C, com frequências variando entre 0,01 Hz e 25 Hz. Posteriormente, foram geradas curvas mestras de  $|G^*|$  e de  $\delta$  na temperatura de referência de 25°C, usando o princípio de superposição frequência-temperatura.



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



### Parâmetros GR e valor R

O projeto NCHRP 09-59 (2022) propôs o uso do parâmetro GRP, cujo cálculo utiliza a mesma fórmula que o GR de Glover et al. (2005), que é um quociente entre parâmetros viscoelásticos, obtidos na frequência de 0,005 rad/s, ou seja, 0,0008 Hz, e na temperatura de 15°C. O GRP, por sua vez, é medido na frequência de 10 rad/s e em uma temperatura definida pelo grau PG de baixa temperatura do ligante (25°C ou 27°C quando o PG baixo for -22°C ou -16°C, respectivamente). O GRP é obtido por meio da Equação 1, empregando  $|G^*|$  e  $\delta$  determinados nestas condições, sendo representado no diagrama de espaço *Black*.

$$GRP = \frac{|G^*| * (\cos\delta)^2}{\text{sen}\delta} \quad (1)$$

Em termos de limites, para o tradicional indicador de fadiga do *Superpave*,  $|G^*|. \text{sen}\delta$ , com material pós PAV (AASHTO M320, 2017) e para o GRP pós PAV, o valor máximo permitido é de 5.000 kPa (NCHRP 09-59, 2022). Para o GR, altos valores indicam fragilidade, utilizando o valor de 180 kPa para representar a maior propensão ao início da zona de dano e o de 600 kPa para as trincas em bloco (CHRISTENSEN *et al.*, 2019; KOUDELKA *et al.*, 2019).

Segundo o NCHRP 09-59 (2022), recomenda-se o valor de R do modelo Christensen-Anderson (CHRISTENSEN; ANDERSON, 1992) para prever a resistência à fadiga, com uma faixa permissível de 1,5 a 2,5. A Equação 2 mostra como o parâmetro é obtido. Observa-se que o R, denominado neste trabalho como R (9-59), é calculado com material envelhecido pós PAV e depende do módulo de rigidez (S) a 60 segundos e da taxa de relaxação (m) a 60 segundos.

$$R (9-59) = \log(2) * \frac{\log(S/3.000)}{\log(1 - m)} \quad (2)$$

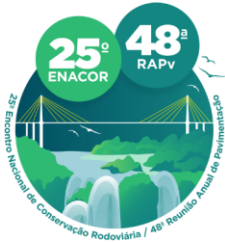
O valor R original, obtido da curva mestra e denominado simplesmente como valor R, refere-se à diferença, no domínio da frequência angular reduzida, entre os logaritmos do módulo de cisalhamento vítreo ( $|G_g^*|$ ) e do módulo de transição *crossover* (ANDERSON; KENNEDY, 1993; ANDERSON *et al.*, 2011).

O  $\Delta T_c$  é um parâmetro surgido nos últimos anos e proposto como indicador de resistência ao trincamento na caracterização LVE. É definido como a diferença entre as temperaturas críticas  $T_{crítica,s}$  e  $T_{crítica,m}$ , que correspondem, respectivamente, à temperatura (°C) em que a rigidez (S) alcança o limite máximo de 300 MPa e à temperatura em que o limite mínimo do valor m de 0,3 é alcançado. É calculado pela Equação 3. Valores permissíveis para  $\Delta T_c$  vêm sendo estabelecidos. Em geral, buscam-se valores acima de limites mínimos. Um valor de -2,5°C tem sido adotado como limite para indicar o início de trincas (ROWE, 2011). Por sua vez, quando se atinge -5,0°C, considera-se que há trincamento (ANDERSON *et al.*, 2011). Valores mais negativos ainda geralmente são associados com trincamentos em bloco.

$$\Delta T_c = T_{crítica,s} - T_{crítica,m} \quad (3)$$

### Linear Amplitude Sweep (LAS)

O ensaio de varredura de amplitude linear foi realizado para avaliação da resistência à fadiga dos ligantes asfálticos. O método utilizado seguiu as recomendações de envelhecimento pós RTFOT, com o critério de ruptura do valor máximo da energia segundo a abordagem da pseudo-energia dissipada (*Pseudo-Strain Energy*, PSE, em inglês) a 19°C (DNIT 439 - ME, 2022) e a 25°C.



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



### Ensaio nas misturas asfálticas

Para a caracterização viscoelástica linear, foram obtidos os valores de módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ) para cada uma das misturas, nas frequências 0,1 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz e 25 Hz e nas temperaturas 4°C, 20°C, 40°C e 54°C (DNIT 416 - ME, 2019). Com base nessas informações, foram plotadas as curvas mestras do  $|E^*|$  e do  $\delta$ .

O ensaio de fadiga por tração direta uniaxial foi conduzido de acordo com o protocolo estabelecido na norma AASHTO TP-107 (2014), na frequência de 10 Hz e na temperatura de 20°C. Os resultados obtidos foram analisados com o modelo de dano contínuo viscoelástico linear (S-VECD), a partir das curvas  $C \times S$  (integridade  $\times$  dano). O estudo focou na avaliação do Fator de Fadiga da Mistura (FFM) a 20°C (NASCIMENTO, 2015) e do parâmetro de redução média da pseudo-rigidez ( $C$ ) ao longo do ensaio até o momento da ruptura ( $D^R$ ) (WANG; KIM, 2017). A formulação matemática do FFM está descrita na Equação 4, onde um maior FFM indica melhor resistência à fadiga da mistura.  $D^R$  acompanha a mesma tendência.

$$FFM = \frac{\log(N_{f,100\mu\epsilon}) + \log(N_{f,200\mu\epsilon})}{2} * (\log(200) - \log(100)) \quad (4)$$

Onde  $N_{f,100\mu\epsilon}$  e  $N_{f,200\mu\epsilon}$  representam a vida de fadiga da mistura asfáltica para 100  $\mu\epsilon$  e 200  $\mu\epsilon$ , respectivamente, sendo valores tipicamente encontrados nas camadas do revestimento asfáltico.

O Fator de Fadiga do Ligante (FFL) é calculado de forma semelhante ao FFM, mas com o  $N_{f,1,25\%}$  e o  $N_{f,2,50\%}$ , que correspondem ao número de ciclos até a ruptura para deformações cisalhantes de 1,25% e de 2,50%, respectivamente (UNDERWOOD, 2011; OSMARI, 2021).

Wang e Kim (2017) propuseram o critério de  $D^R$  como uma integração de uma expressão que considera a redução de  $C$  e o  $N_f$  (número de ciclos até a ruptura) (Equação 5). Os autores indicaram que o parâmetro é independente da temperatura, do modo e da amplitude de carregamento do ensaio. Zhang *et al.* (2019) observaram que o  $D^R$  diminui com o envelhecimento do material, evidenciando a evolução da degradação por fadiga com o tempo e com a exposição a agentes ambientais.

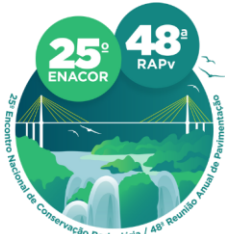
$$D^R = \frac{\int_0^{N_f} (1 - C) dN}{N_f} \quad (5)$$

Ogbo *et al.* (2019) propuseram o uso do parâmetro GR para avaliar a resistência ao trincamento em temperatura intermediária das misturas asfálticas diretamente a partir dos dados do espaço *Black* ( $\delta$  vs  $|E^*|$ ). Um valor de G-Rm mais baixo é desejado para misturas asfálticas com menor fragilidade e potencialmente menor suscetibilidade ao trincamento em bloco (OGBO *et al.*, 2019; MARTIN *et al.*, 2020). O G-Rm é calculado segundo a Equação 6.  $|E^*|$  e  $\delta$  são medidos a 20°C e 5 Hz.

$$G-R_m = |E^*| \frac{(\cos\delta)^2}{\sin\delta} \quad (6)$$

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores obtidos para o  $\Delta T_c$  dos asfaltos são apresentados na Figura 2. Na figura, são indicados os limites mínimos de -5,0 e -2,5. Observa-se que o ligante F, não modificado e de grau PG 64S-22, apresentou um valor de -5,08. Em contrapartida, o ligante E, de grau 64S-16, teve o maior valor, 1,43.



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Um valor mais negativo de  $\Delta T_c$  geralmente é associado à formação de trincas térmicas ou a trincas em uma situação em que não há carregamento. Vale mencionar que os ligantes modificados, G e H, apresentaram valores distantes do mínimo requerido, como esperado.

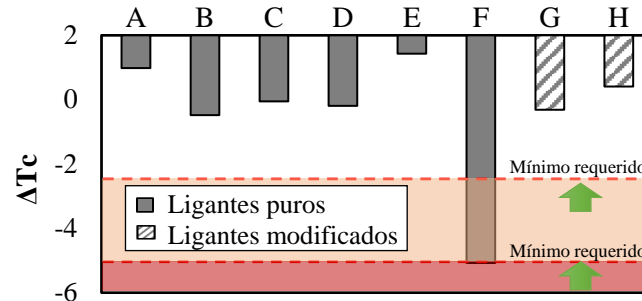


Figura 2. Resultado do  $\Delta T_c$  com os limites requeridos.

Os resultados dos índices reológicos valor R, R (9-59) e R original são mostrados na Figura 3. O projeto NCHRP 09-59 (2022) recomenda valores de 1,5 a 2,5 para material envelhecido pós PAV e diz que asfaltos com valor R mais alto resultam em acúmulo mais rápido de dano por fadiga. Também é indicado que valores altos de R são geralmente comuns em materiais altamente envelhecidos e oxidados. Um fato notável é que os maiores valores de R (9-59) e R do ligante F indicam provavelmente uma correspondência com o  $\Delta T_c$ , que apresentou o menor valor (-5,08) entre os ligantes. As Figuras 3a e 3b indicam a existência de uma correlação entre os valores R (9-59) e R, ainda que tenham sido determinados por métodos diferentes, com o uso do BBR e do DSR, respectivamente.

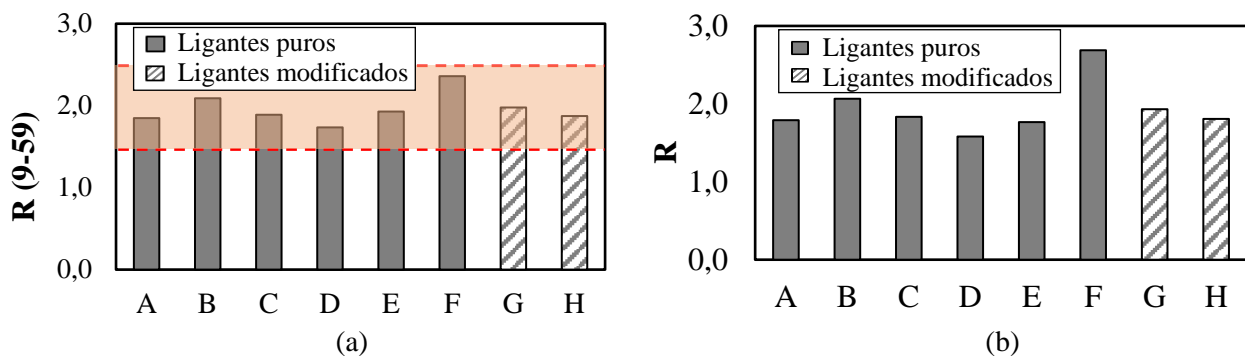
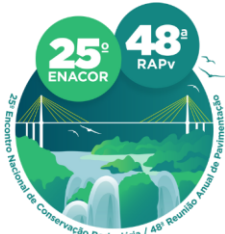


Figura 3. Resultados do valor R segundo: a) o projeto NCHRP 09-59 (2022) e b) R da curva mestra.

Foram construídos três cenários com diagramas de espaço *Black* para os ligantes, como ilustrado na Figura 4, visando observar as variações do GRP e GR com a temperatura intermediária. Além disso, foram plotados os limites para gerar um critério de aprovação ou reprovação.

Para o ligante C, não modificado e de PG 70S-16, é observado que apesar de apresentar resultados aceitáveis de  $\Delta T_c$ , R (9-59) e R, os valores atingiram a zona de dano na Figura 4a, definida como aquela em que  $|G^*|.sen\delta$  é igual a 5.000 kPa. Além disso, este ligante apresentou um comportamento similar nas condições da Figura 4b, sendo o único a entrar na zona de dano para GRP. Por sua vez, a Figura 4c mostram os materiais para os quais o valor de GR foi superior a 180 kPa.

É importante ressaltar que nas Figuras 4a e 4b, o ligante F apresentou resultado afastado da zona de dano. Porém, na Figura 4c, este ligante teve resultado posicionado dentro da zona de dano, superando o valor mínimo de 180 kPa para o GR. Este comportamento é compatível com os



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



observados anteriormente para os parâmetros  $\Delta T_c$  e para os valores  $R$ . O uso dos diagramas com limites é uma ferramenta interessante para diferenciar e classificar asfaltos modificados e não modificados.

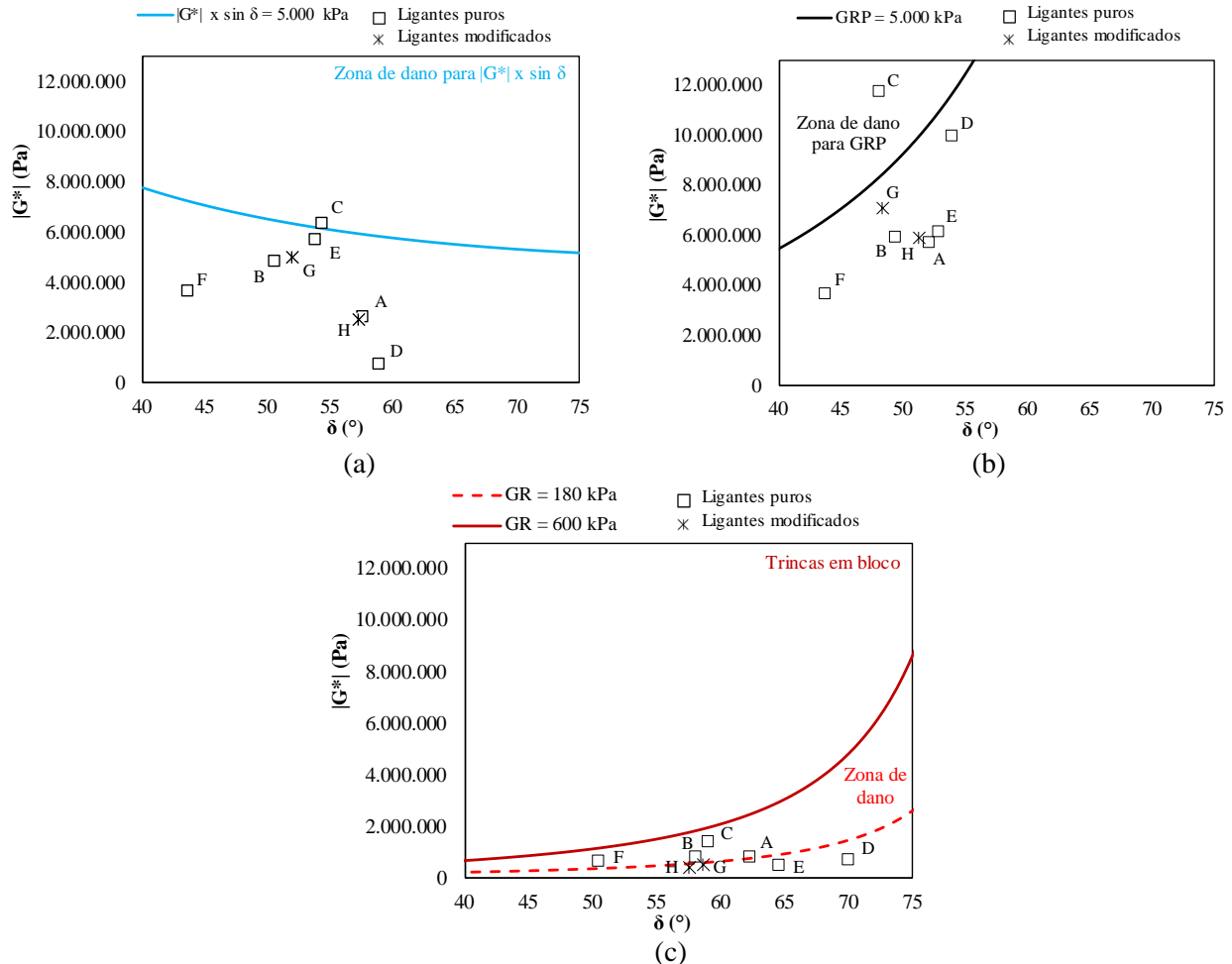
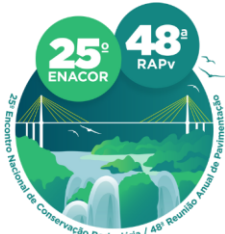


Figura 4. Diagrama de espaço *Black* do GR e do GRP dos ligantes segundo: a) temperatura e limites da AASHTO M320 (2017), b) temperatura e limites sugeridos pelo NCHRP 09-59 (2022) e c) temperatura e limites do GR original a 15°C e a 0,005 rad/s.

A Tabela 3 apresenta um ranqueamento considerando diferentes parâmetros adotados para a caracterização da resistência à fadiga de misturas (FFM,  $D^R$  e G-R) e de ligantes. Para os ligantes, o  $|G^*|.sen\delta$  é avaliado sob três perspectivas: i) de acordo com a proposta original da norma AASHTO M320 (2017) ( $|G^*|.sen\delta$  (M320)), ii) a partir do GRP ( $|G^*|.sen\delta^*$ ) e iii) a partir do GR a 15°C ( $|G^*|.sen\delta^{**}$ ). Os resultados obtidos foram favoráveis para a classificação das misturas. Para FFM,  $D^R$  e G-Rm, foi identificada a mesma ordem: primeira e segunda colocações para as misturas M-H e M-F, respectivamente.

A comparação entre os índices reológicos de ligantes ordenou de forma similar a primeira e a última colocação quando considerados os parâmetros o  $|G^*|.sen\delta$  (M320) e  $|G^*|.sen\delta^{**}$ . Destaca-se a compatibilidade de resultados dos índices do ligante C com a mistura M-C, apresentando um dos desempenhos à fadiga menos favoráveis. As variações no ordenamento podem ser justificadas pelas propriedades intrínsecas não avaliadas ou não controladas, como o tipo de agregado utilizado, os





19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



diferentes TMNs, o teor de ligante de projeto, as temperaturas intermediárias estudadas, entre outros fatores.

Tabela 3. Ranqueamento das misturas e ligantes asfálticos quanto ao comportamento à fadiga.

Mistura	FFM	Ordem	D <sup>R</sup>	Ordem	G-Rm (MPa)	Ordem	G* .sinδ (M320) (kPa)	Ordem	G* .sinδ* (kPa)	Ordem	G* .sinδ** (kPa)	Ordem
M-A	1,312	8	0,339	4	26500	4	2224	2	4476	3	642	7
M-B	1,565	5	0,370	3	24361	3	3729	4	4442	2	629	6
M-C	1,345	7	0,274	8	43301	8	5157	8	8703	8	1160	8
M-D	1,466	6	0,310	7	30374	6	4457	6	8042	7	581	5
M-E	1,615	4	0,325	6	27664	5	4594	7	4857	5	391	2
M-F	1,776	2	0,429	2	20553	2	2500	3	2500	1	453	4
M-G	1,773	3	0,334	5	32652	7	3947	5	5311	6	444	3
M-H	2,206	1	0,540	1	11180	1	2144	1	4624	4	355	1

As variáveis estudadas foram correlacionadas com regressões lineares para obter o R<sup>2</sup>, conforme a Tabela 4. O mapa de calor da tabela indica fortes correlações com os valores R e correlações muito fracas ou inexistentes para parâmetros como o GR na temperatura de 15°C. Nota-se que o FFM, parâmetro atualmente popular no país para a avaliação do comportamento à fadiga de misturas, foi mais sensível aos parâmetros do ensaio LAS do que aos outros índices reológicos estudados. Mesmo assim, perceberam-se correlações moderadas, como para o parâmetro utilizado na norma brasileira DNIT 439 - ME (2022), FFL, quando comparado com o FFM (R<sup>2</sup> de 0,36). Acredita-se que as correlações foram afetadas por fatores como os diferentes ligantes utilizados neste estudo, o teor de ligante de projeto, a volumetria, os agregados, as granulometrias e os TMNs, que são variáveis relevantes na avaliação da resistência à fadiga das misturas asfálticas. Este tipo de análise considerando características de ligantes e de misturas permite a avaliação ampla de cenários para a identificação de parâmetros que quantifiquem a resistência à fadiga dos pavimentos de forma mais adequada.

Tabela 4. Coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) entre parâmetros de fadiga de ligantes e misturas.

	GRP	G* .senδ*	GR**	G* .senδ (M320)†	R (9-59)*	R	ΔTc	LAS pós RIFOT a 19°C				LAS pós RIFOT a 25°C			FFM	D <sup>R</sup>	
								FFL	G*  <sub>inic</sub>	LAS A <sup>†</sup>	LAS B <sup>††</sup>	FFL	G*  <sub>inic</sub>	LAS A	LAS B		
G* .senδ*	0,71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GR**	0,33	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G* .senδ (M320)†	0,49	0,55	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R (9-59)*	0,09	0,50	0,22	0,09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R	0,08	0,47	0,26	0,15	0,96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ΔTc	0,01	0,19	0,21	0,08	0,70	0,82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FFL	0,05	0,41	0,14	0,31	0,56	0,64	0,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G*  <sub>inic</sub>	0,38	0,73	0,00	0,40	0,44	0,43	0,22	0,73	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LAS A <sup>†</sup>	0,08	0,38	0,14	0,21	0,74	0,86	0,88	0,72	0,47	-	-	-	-	-	-	-	-
LAS B <sup>††</sup>	0,00	0,15	0,57	0,04	0,72	0,81	0,76	0,36	0,08	0,65	-	-	-	-	-	-	-
FFL	0,08	0,35	0,03	0,38	0,25	0,30	0,18	0,85	0,77	0,39	0,08	-	-	-	-	-	-
G*  <sub>inic</sub>	0,52	0,83	0,01	0,47	0,31	0,28	0,05	0,48	0,85	0,25	0,03	0,57	-	-	-	-	-
LAS A	0,10	0,27	0,00	0,43	0,16	0,22	0,20	0,71	0,65	0,39	0,04	0,89	0,42	-	-	-	-
LAS B	0,00	0,23	0,56	0,13	0,74	0,86	0,75	0,63	0,24	0,77	0,91	0,30	0,14	0,22	-	-	-
FFM	0,10	0,14	0,04	0,29	0,02	0,02	0,02	0,36	0,47	0,09	0,02	0,68	0,31	0,84	0,02	-	-
D <sup>R</sup>	0,48	0,66	0,00	0,69	0,33	0,38	0,28	0,52	0,67	0,43	0,10	0,57	0,56	0,68	0,24	0,55	-
G-Rm	0,87	0,72	0,16	0,60	0,19	0,19	0,11	0,16	0,46	0,20	0,02	0,19	0,49	0,27	0,04	0,25	0,78

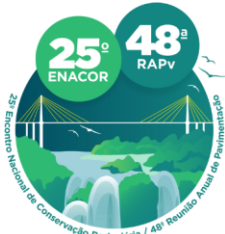
Nota\*: (9-59), que utiliza a definição de temperatura intermediária do NCHRP 09-59 (2022).

Nota\*\*: GR a uma temperatura de 15°C e a uma frequência de 0,005 rad/s.

Nota†: (M320), que utiliza a definição da temperatura intermediária da AASHTO M320 (2017).

Nota†: Parâmetro A do ensaio LAS.

Nota††: Parâmetro B do ensaio LAS.



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Com a matriz apresentada na Tabela 4, foi possível correlacionar os diferentes resultados e observar índices específicos. A Figura 5 apresenta a correlação de G-Rm com GRP e GR, respectivamente. A atualização na metodologia de determinação do parâmetro GR mostrou um efeito positivo quando correlacionado com o resultado da mistura. Inicialmente, foi observado um  $R^2$  de 0,16 para o parâmetro GR. Já para a nova metodologia de seleção de temperaturas (parâmetro GRP), a regressão linear subiu para 0,87.

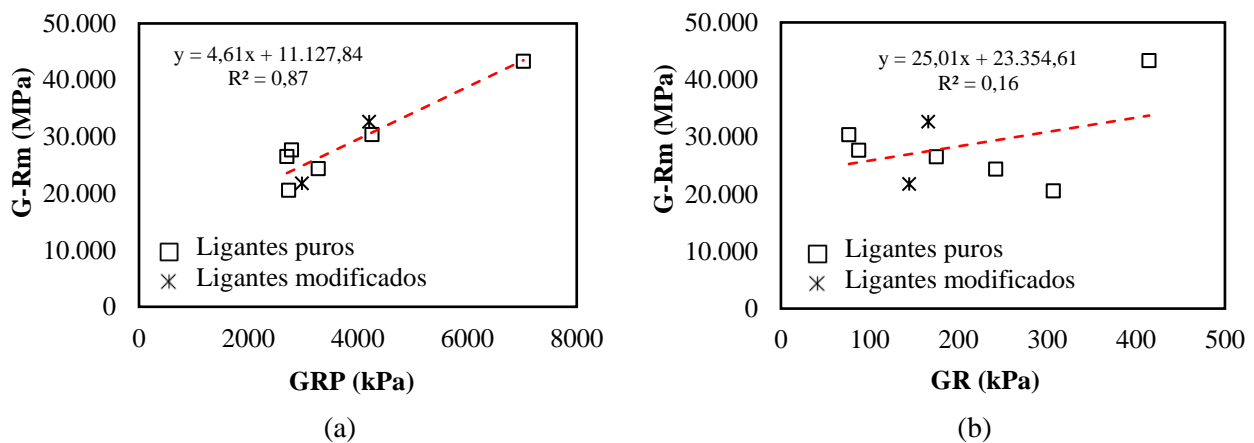
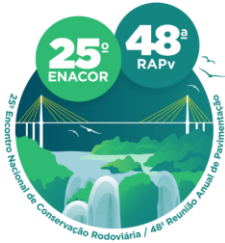


Figura 5. Correlação com regressão linear de G-Rm versus: a) GRP e b) GR.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas análises realizadas para a resistência à fadiga de oito misturas asfálticas produzidas com ligantes não modificados e modificados por polímeros, considerando diversos índices reológicos, conclui-se que:

- Foram encontradas correlações significativas entre índices reológicos dos ligantes (GRP, GR, R,  $\Delta T_c$  e resultados do LAS) e parâmetros de fadiga das misturas (FFM,  $D^R$  e G-Rm), sendo possível realizar um ranqueamento das misturas. Essas correlações podem ser úteis na seleção de ligantes e misturas mais resistentes à fadiga.
- As alterações nos parâmetros LVE investigados no projeto da *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP 09-59, 2022), GRP e R (9-59), mostraram-se satisfatórias, considerando o banco de dados avaliado neste estudo. A mudança na definição da temperatura intermediária para realizar ensaios de fadiga em ligantes foi uma atualização relevante, uma vez que as correlações com as misturas apresentaram melhora significativa. Futuras mudanças podem ser estudadas e adaptadas para diferentes climas.
- O FFM revelou-se mais sensível ao ensaio LAS do que a outros índices reológicos de ligantes analisados. Houve uma correlação moderada com o parâmetro FFL, utilizado na norma brasileira DNIT para avaliar a fadiga de ligantes.
- Diagramas de espaço *Black* para ligantes apresentaram potencial como ferramenta para diferenciar o comportamento dos ligantes não modificados e modificados. Contudo, é necessário procurar valores limites para a realidade dos ligantes brasileiros.
- Este estudo destaca a importância da continuação de pesquisas e a necessidade da expansão do conhecimento com a criação de bases de dados para ligantes e misturas asfálticas com materiais brasileiros. Sugerem-se estudos mais amplos com um número maior de dados para avaliar parâmetros GRP em diferentes temperaturas intermediárias.



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)

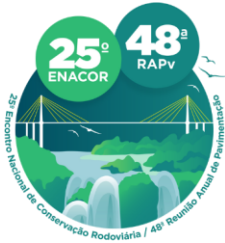


## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), do CENPES/PETROBRAS e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO TP107. (2014). Standard method of test for determining the damage characteristic curve of asphalt mixtures from direct tension cyclic fatigue tests. American Association of State Highway Transportation Officials: Washington, DC, USA
- AASHTO M320. (2017). Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. American Association of State and Highway Transportation Officials.
- AASHTO M332. (2020). Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. American Association of State and Highway Transportation Officials.
- ANDERSON, D. A., CHRISTENSEN, D. W., & BAHIA, H. (1991). Physical properties of asphalt cement and the development of performance-related specifications. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 60.
- ANDERSON, D. A., & KENNEDY, T. W. (1993). Development of SHRP binder specification (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 62.
- ANDERSON, R. M., et al. (2011). Evaluation of the Relationship Between Asphalt Binder Properties and Non-Load Related Cracking. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 80, 615-664.
- ASTM D2872. (2019). 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 D6521. (2019). Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). American Society for Testing and Materials.
- ASTM D7175. (2015). Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. American Society for Testing and Materials.
- BAHIA, H. U., ZHAI, H., ZENG, M., HU, Y., & TURNER, P. (2001). Development of binder specification parameters based on characterization of damage behavior (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 70.
- BARROS, L. M., DO NASCIMENTO, L. A. H., ARAGÃO, F. T. S., UNDERWOOD, B. S., & DO CANTO PIVETTA, F. (2022). Characterization of the permanent deformation of asphalt mixtures based on indexes and on pavement structural performance. *Constr. Build. Mater.*, 326, 126555.
- BERNUCCI, L. L. B., MOTTA, L. M. G. D., CERATTI, J. A. P., & SOARES, J. B. (2022). Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 2ª edição. Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA.
- CHRISTENSEN, D. W., & ANDERSON, D. A. (1992). Interpretation of dynamic mechanical test data for paving grade asphalt cements (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 61.
- CHRISTENSEN, D., et al. (2019). Past, present, and future of asphalt binder rheological parameters: synopsis of 2017 technical session 307. In: 96th Annual Meeting of the Transportation Research Board (Transportation Research Board).
- CUNHA, M. C., ZEGARRA, J. R. E., & FERNANDES JR., J. L. (2007). Revisão da seleção do grau de desempenho (PG) de ligantes asfálticos por estados do Brasil. 21º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET.
- DEACON, J. A., HARVEY, J. T., TAYEBALI, A., & MONISMITH, C. L. (1997). Influence of binder loss modulus on the fatigue performance of asphalt concrete pavements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 66, 633-668.



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



DNIT 031 - ES. (2006). Pavimentação Asfáltica – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.

DNIT 416 - ME. (2019). Pavimentação Asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.

DNIT 439 - ME. (2022). Pavimentação – Ligante Asfáltico – Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS – Linear Amplitude Sweep) – Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.

FACCIN, C., et al. (2021). Mapas de grau de desempenho (PG) de ligantes asfálticos para o Brasil. 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET, 2021.

GLOVER, C. J., et al. (2005). Development of a New Method for Assessing Asphalt Binder Durability with Field Validation. Texas Transportation Institute, 1872, 1-334.

GOOSEN, E. S., & JENKINS, K. J. (2023). Understanding Bitumen Aging through Interrelationships and Aging Ratios. Transportation Research Record, 03611981221147519.

KOUDELKA, T., COUFALIK, P., FIEDLER, J., COUFALIKOVA, I., VARAUS, M., & YIN, F. (2019). Rheological evaluation of asphalt blends at multiple rejuvenation and aging cycles. Road Mater. Pavement Des, 20, S3-S18.

LEITE, L. F., OSMARI, P. H., & ARAGÃO, F. T. S. (2022). Rheological Indexes for Asphalt Binders Considering Different Aging Conditions: Evaluation and correlations with performance. Constr. Build. Mater., 338, 127549, 1-10.

MARTIN, A. E., et al. (2020). Evaluating the effects of recycling agents on asphalt mixtures with high RAS and RAP binder ratios (No. Project 09-58).

NASCIMENTO, L. A. H. (2015). Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil. Tese de Doutorado, North Carolina State University, Raleigh, NC.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. (2022). Relationships Between the Fatigue Properties of Asphalt Binders and the Fatigue Performance of Asphalt Mixtures (No. 982). Washington, DC: The National Academies Press.

OGBO, C., KASEER, F., OSHONE, M., SIAS, J. E., & MARTIN, A. E. (2019). Mixture-based rheological evaluation tool for cracking in asphalt pavements. Road Mater. Pavement Des, 20(sup1), S299-S314.

OSMARI, P. H. (2021). Characterization of the Fatigue Damage Behavior of Asphaltic Materials Based on Experimental Multiscale Approaches and on the S-VECD Theory. Tese de Doutorado, Rio de Janeiro.

ROWE G. M. (2011). Prepared Discussion for the AAPT Paper by Anderson et al.: Evaluation of the Relationship Between Asphalt Binder Properties and Non-Load Related Cracking. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 80, 649-662.

UNDERWOOD, B. S. Multiscale Constitutive Modeling of Asphalt Concrete. Tese de Doutorado, North Carolina State University - Raleigh, North Carolina, 2011.

WANG, Y., & KIM, Y. R. (2017). Development of a pseudo strain energy-based fatigue failure criterion for asphalt mixtures. International Journal of Pavement Engineering, 20(10), 1182-1192.

YANG, K., LI, R., CASTORENA, C., & UNDERWOOD, B. S. (2022). Correlation of asphalt binder linear viscoelasticity (LVE) parameters and the ranking consistency related to fatigue cracking resistance. Constr. Build. Mater., 322, 126450.

ZEIADA, W., et al. (2022). Review of the Superpave Performance Grading System and Recent Developments in the Performance-Based Test Methods for Asphalt Binder Characterization. Constr. Build. Mater., 319, 126063, 1-33.

ZHANG, R., SIAS, J. E., DAVE, E. V., & RAHBAR-RASTEGAR, R. (2019). Impact of aging on the viscoelastic properties and cracking behavior of asphalt mixtures. Transportation Research Record, 2673(6), 406-415.

ZHANG, R., SIAS, J. E., & DAVE, E. V. (2020). Development of new performance indices to evaluate the fatigue properties of asphalt binders with ageing. Road Mater. Pavement Des, 23(2), 377-396.