



26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

EXPLORANDO O DESEMPENHO DE FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM BASE NO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO LINEAR

*Marcos Lamha Rocha¹; Alexis Jair Enríquez-León¹; Leni Figueiredo Mathias Leite¹; Francisco
Thiago Sacramento Aragão¹; Larissa Montagner de Barros² &
Luis Alberto Herrmann do Nascimento³*

RESUMO

Os danos por fadiga e por deformação permanente são influenciados pelas propriedades reológicas das misturas asfálticas, tais como rigidez e capacidade de relaxação, que mudam com o envelhecimento e a incorporação de materiais reciclados ou aditivos. Reconhecendo a complexidade dessa dinâmica, o presente estudo aprofundou-se na análise reológica de misturas asfálticas, buscando estabelecer correlações entre as propriedades viscoelásticas lineares e o desempenho das misturas. Por meio de uma abordagem analítica e experimental, foram investigadas 13 misturas asfálticas utilizando uma gama de ligantes oriundos de diversas regiões do Brasil, incluindo não modificados, modificados por borracha e por polímeros. A investigação empregou parâmetros inovadores como o G^* -Rm, adaptado para misturas asfálticas, e o tradicional $|G^*|/\sin\delta$. Embora esses parâmetros forneçam perspectivas importantes sobre o comportamento das misturas, sua eficácia é influenciada pelas configurações do ensaio, como frequência e temperatura, destacando a importância de uma seleção cuidadosa dessas condições. A partir de métodos analíticos e experimentais, incluindo a otimização de correlações e a análise de diversas combinações de temperatura e frequência, foram identificadas configurações ótimas que realçam a relação entre as propriedades reológicas e o desempenho das misturas. Por fim, foi proposto um novo parâmetro combinando módulo dinâmico e taxa de evolução de dano (α), que obteve forte correlação com o índice de fadiga FFM.

PALAVRAS-CHAVE: pavimento; módulo dinâmico; viscoelasticidade; desempenho

ABSTRACT

Fatigue and rutting damages are influenced by the rheological properties of asphalt mixtures, such as stiffness and relaxation capacity, which change with aging and the incorporation of recycled materials or additives. Recognizing the complexity of this dynamic, the present study delved into the rheological analysis of asphalt mixtures, aiming to establish correlations between the linear viscoelastic properties and the performance of the mixtures. Through an analytical and experimental approach, 13 asphalt mixtures were investigated using a range of binders from various regions of Brazil, including unmodified, rubber-modified, and polymer-modified. The investigation employed innovative parameters such as the G^* -Rm, adapted for asphalt mixtures, and the traditional $|G^*|/\sin\delta$. Although these parameters provide important insights into the behavior of the mixtures, their effectiveness is influenced by the test configurations, such as frequency and temperature, highlighting the importance of a careful selection of these conditions. Through analytical and experimental methods, including the optimization of correlations and the analysis of various combinations of temperature and frequency, optimal configurations were identified to evidence the relationship between the rheological properties and the performance of the mixtures. Finally, a new parameter that combines dynamic modulus and damage evolution rate (α) was proposed and presented strong correlation with the FFM fatigue index.

KEY WORDS: pavement; dynamic modulus; viscoelastic; performance

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, marcos.rocha@coc.ufrj.br; aenriquez.eng@gmail.com; lenimathias@coc.ufrj.br; fthiago@coc.ufrj.br

² Stratura Asfaltos, Paulínia-SP, Brasil, larissa.montagner@hotmail.com

³ CENPES/Petrobras, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, luisnascimento@petrobras.com.br



INTRODUÇÃO

A fadiga do revestimento e deformação permanente da estrutura são os principais tipos de danos em pavimentos asfálticos, limitando sua durabilidade. Tem sido reconhecido que as propriedades reológicas, especificamente a rigidez e a capacidade de relaxação, desempenham um papel importante na resistência à fissuração e à deformação permanente das misturas asfálticas (ROWE; KING; ANDERSON, 2014). Com o envelhecimento, as misturas asfálticas tornam-se mais rígidas e menos capazes de relaxar e dissipar tensões ao longo do tempo, resultando em um aumento da fragilidade e na redução da resistência ao trincamento.

O uso de pavimentos asfálticos com material fresado (*Reclaimed Asphalt Pavements*, RAP) introduz um ligante envelhecido, rígido e frágil nas misturas asfálticas, afetando, em alguns casos, negativamente sua resistência ao trincamento, embora possa melhorar a resistência à formação de trilhas de rodas. Entretanto, a influência negativa sobre a fadiga pode ser atenuada com o uso de ligantes de menor rigidez e grau de desempenho (*Performance Grade*, PG) inferior, ou pela incorporação de aditivos, conhecidos como agentes de reciclagem ou rejuvenescedores (MOGAWER *et al.*, 2013). Por outro lado, as misturas mornas (*Warm Mix Asphalt*, WMA) tendem a ser menos rígidas, o que as torna mais suscetíveis à DP, mas com uma potencial melhora na resistência à fadiga. O uso de aditivos, tanto químicos quanto naturais, tem sido explorado para mitigar os efeitos da compactação a temperaturas mais baixas.

Considerando o papel central do ligante asfáltico na resposta reológica das misturas, pesquisas têm se concentrado em estabelecer correlações entre a reologia do ligante e a resistência à fadiga e à DP. Inicialmente, a ductilidade do ligante, medida a uma temperatura intermediária, mostrou-se um bom indicador do comportamento em campo em termos de trincamento (KANDHAL, 1977). No Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária (*Strategic Highway Research Program*, SHRP), adotou-se o uso do Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer*, DSR) para avaliar a resistência à fadiga a partir de uma relação entre o módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e o ângulo de fase (δ) em temperaturas intermediárias ($|G^*|\sin\delta$). Adicionalmente, a rigidez à fluência e o módulo de relaxação, medidos pelo Reômetro de Flexão em Viga (*Bending Beam Rheometer*, BBR), foram introduzidos para avaliar a resistência ao trincamento em baixas temperaturas. No entanto, essas métricas não refletiram de maneira satisfatória o desempenho em campo, particularmente para o trincamento por fadiga (ROWE *et al.*, 2014). Glover *et al.* (2005) propuseram um parâmetro alternativo, a Função DSR ($G'/[\eta'/G']$), relacionando o módulo de armazenamento de cisalhamento (G') e a viscosidade dinâmica (η') do ligante a uma temperatura e frequência específicas, mostrando inicialmente uma correlação promissora com o trincamento não relacionado à carga.

O parâmetro da Função DSR, em um primeiro momento, demonstrou uma boa correlação com o trincamento não relacionado à carga. Anderson *et al.* (2011) converteram os valores limites de ductilidade para limiares do parâmetro da Função DSR de $9,00E-04$ e $1,00E-03$ MPa/s. O parâmetro da Função DSR foi refinado por Anderson *et al.* (2011) e simplificado para facilitar seu uso prático por Rowe *et al.* (2014), demonstrando eficácia na avaliação da resistência à fadiga em temperaturas intermediárias a partir do parâmetro Glover-Rowe (G-R). O G-R (Equação 1) usa $|G^*|$ e δ do ligante asfáltico medido a uma temperatura de 15°C e uma frequência de $0,005$ rad/s.



$$G - R = \frac{|G^*|(\cos\delta)^2\omega}{\sin\delta} \quad (1)$$

Esta simplificação, ao permitir a plotagem dos limites dos parâmetros no espaço Black (uma representação gráfica de $|G^*|$ versus δ), torna mais intuitiva a visualização de como as propriedades do ligante evoluem com o envelhecimento. Os limiares estabelecidos pela Função DSR foram adaptados para definir limites para o parâmetro G-R, estabelecendo que um valor de 180 kPa marca o início do processo de fissuração, enquanto valores de 600 kPa ou mais são indicativos de fissuração significativa (CHRISTENSEN *et al.*, 2019). A Figura 1, conforme apresentado por Rowe *et al.* (2016), emprega o parâmetro G-R no espaço Black para prever o trincamento induzido por envelhecimento, demonstrando a eficácia dessa metodologia na interpretação das mudanças nas propriedades reológicas do ligante asfáltico ao longo do tempo.

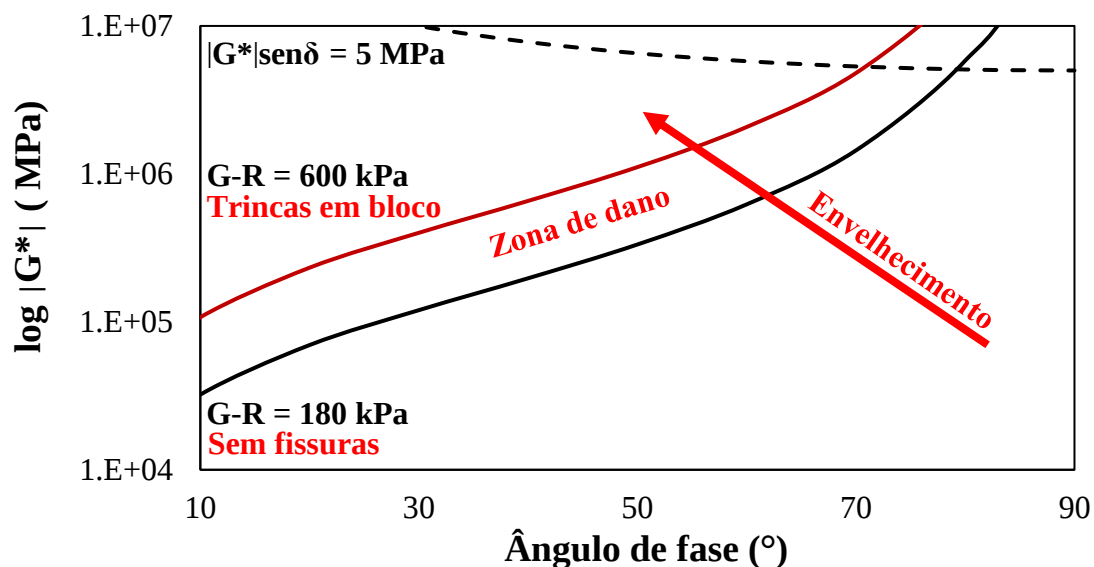


Figura 1: Espaço Black para a previsão do trincamento induzido por envelhecimento.

No que diz respeito à deformação permanente, o Superpave adotou inicialmente o parâmetro $|G^*|/\sin\delta$ para avaliar a resistência do ligante asfáltico a este tipo de dano. Os ensaios são realizados com uma geometria de placas paralelas de diâmetro de 25 mm para temperaturas superiores a 58°C e de 8 mm para temperaturas entre 22°C e 37°C, sempre à frequência de 10 rad/s. Esse parâmetro é baseado no princípio de que a resistência à deformação permanente pode ser incrementada tanto pelo aumento da rigidez do material ($|G^*|$ mais alto) quanto pela melhoria de sua elasticidade relativa (valores mais baixos de δ). Sob essa perspectiva, ligantes com valores elevados de $|G^*|/\sin\delta$ demonstrariam maior resistência à deformação permanente, dado que reduziriam a energia dissipada após cada ciclo de carga, relacionada ao surgimento de deformações permanentes no pavimento (BAHIA; ANDERSON, 1995, ROBERTS *et al.*, 1996). Posteriormente, foram feitas tentativas para desenvolver novos métodos de ensaio para prever o desempenho independentemente do tipo de modificação, como o ensaio Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas (*Multiple Stress Creep and Recovery*, MSCR), para caracterizações de deformação permanente.



Embora os parâmetros $|G^*|/\sin\delta$ e G-R se apresentem como indicadores eficazes para avaliar a resistência à deformação permanente e à fadiga, é importante notar que ambos foram desenvolvidos especificamente para ligantes asfálticos. Considerando isso, embora seja possível estimar algumas propriedades das misturas asfálticas a partir das propriedades dos ligantes, torna-se evidente a necessidade de desenvolver métodos mais diretos e adaptados para avaliar as misturas asfálticas em si, seguindo premissas semelhantes.

Mensching *et al.* (2015) foram pioneiros na introdução do parâmetro baseado em misturas G-R (G-Rm), baseado no módulo dinâmico ($|E^*|$) e no δ da mistura asfáltica, conforme delineado na Equação 2. Visando estabelecer um único ponto de avaliação, o estudo identificou combinações específicas de temperatura e frequência, particularmente aquelas próximas aos pontos de inflexão, como indicadores promissores para avaliar a resistência das misturas asfálticas ao trincamento em baixas temperaturas.

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

Em um desenvolvimento subsequente, Oshone *et al.* (2018) investigaram diversas combinações de temperatura e frequência, incluindo 15°C nas frequências de 0,005 rad/s; 5 rad/s; e 500 rad/s, além de uma combinação específica ajustada ao grau de desempenho do ligante asfáltico em baixas temperaturas. Este estudo destacou o potencial do parâmetro G-Rm para diferenciar as misturas asfálticas eficazmente, em especial na combinação de 15°C e 5 rad/s, e na temperatura ajustada ao grau de desempenho do ligante mais 10°C, com uma frequência de 0,01666 rad/s.

Ogbo *et al.* (2019) propuseram explorar uma nova dimensão ao avaliar o parâmetro *Flexibility Index* (FI), utilizando o ensaio de flexão semicircular (*Semicircular Bending*, SCB) a uma temperatura fixa de 20°C e frequência de 5 Hz. Esta proposta foi reforçada pelo projeto NCHRP 09-58, que, sob condições idênticas, definiu um limiar de 8.000 MPa para o FI, sugerindo um critério robusto para a avaliação da resistência ao trincamento e à deformação (MARTINS *et al.*, 2019, MARTINS *et al.*, 2020). Habbouche *et al.* (2021) constataram uma notável correlação entre o FI, obtido do ensaio SCB, e o parâmetro G-Rm, com o CTindex (Ensaio Ideal-CT) e NF_{le} (Fadiga por compressão diametral) seguindo em ordem de relevância. A investigação de Zhang *et al.* (2022) contribuiu para essa base de conhecimento, identificando as variáveis críticas do ligante e da mistura, como os graus de desempenho do ligante (alto e baixo PG), o teor de ligante, a Relação Betume-Vazios (RBV), o volume de vazios e o teor de RAP, que influenciam significativamente o parâmetro G-Rm, além de estabelecer uma forte correlação com os resultados do ensaio SCB.

Diante deste contexto, o objetivo desta pesquisa é avaliar os parâmetros derivados de ensaios viscoelásticos lineares aplicados a misturas asfálticas, correlacionando-os com a resistência à fadiga e à deformação permanente. Essa abordagem se justifica pela necessidade de adaptar e expandir as metodologias originalmente desenvolvidas para ligantes asfálticos, como base em parâmetros como $|G^*|/\sin\delta$ e G-R, por exemplo, a fim de fornecer indicadores mais diretos e aplicáveis às misturas asfálticas em si.



METODOLOGIA

Neste estudo, 13 misturas asfálticas foram selecionadas para caracterização, incorporando ligantes oriundos de distintas regiões do Brasil. Estes foram categorizados em três grupos: ligantes não modificados, modificados por borracha (AB-8) e modificados por polímero, incluindo as classes 65/90, 60/85 e um ligante altamente modificado (HiMA). Os asfaltos convencionais foram classificados conforme as penetrações PEN 30/45 e 50/70. Adicionalmente, a classificação desses materiais sob o critério PG Superpave foi realizada de acordo com a norma AASHTO M332, como detalhado na Tabela 1. Gnaisse e basalto foram selecionados como agregados para compor as misturas, apresentando Tamanhos Máximos Nominais (TMNs) de 12,5 mm e 19,0 mm.

Tabela 1. Características dos ligantes, agregados e misturas avaliadas

ID	Agregado		Ligante		
	Origem	TMN (mm)	Classe	Modificação	PG
M1	Basalto - Mato Grosso do Sul	19,0	30/45	-	70S-16
M2	Basalto - Mato Grosso do Sul	19,0	65/90	Polímero	70E-22
M3	Basalto - Mato Grosso do Sul	19,0	HiMA	Polímero	76E-22
M4	Gnaisse - Minas Gerais	12,5	50/70	-	64S-22
M5	Gnaisse - Minas Gerais	12,5	30/45	-	64S-16
M6	Gnaisse - Minas Gerais	12,5	50/70	-	58S-16
M7	Gnaisse - Minas Gerais	12,5	50/70	-	64S-28
M8	Gnaisse - Minas Gerais	12,5	AB-8	Asfalto Borracha	76S-22
M9	Gnaisse - Minas Gerais	12,5	AB-8	Asfalto Borracha	70S-28
M10	Gnaisse - Minas Gerais	12,5	AB-8	Asfalto Borracha	82S-28
M11	Gnaisse - Minas Gerais	12,5	HiMA	Polímero	82E-22
M12	Gnaisse - Minas Gerais	12,5	60/85	Polímero	70H-22
M13	Gnaisse - Minas Gerais	12,5	60/85	Polímero	76S-22

Para a caracterização reológica das misturas, a primeira etapa consistiu na realização de ensaios para determinar a rigidez. O módulo de dinâmico ($|E^*|$) e o ângulo de fase (δ) foram avaliados por meio de ensaios de varredura de frequência sob condição de carregamento uniaxial, conforme especificado pela norma DNIT 416 - ME. As curvas mestras relativas a $|E^*|$ foram então elaboradas, tomando como referência a temperatura de 20°C e aplicando o princípio da superposição de frequência-temperatura. Os ensaios abrangeram frequências de 0,1 Hz a 25 Hz e temperaturas de 4°C a 54°C. Como parte complementar do estudo, as séries de Prony foram calculadas para todas as misturas, o que permitiu estimar o módulo dinâmico e o ângulo de fase em qualquer combinação de temperatura e frequência dentro do espectro de condições avaliadas. Além disso, foi calculada a taxa de evolução do dano (α), que é definida como a máxima inclinação da curva de módulo de relaxação em função do tempo reduzido, em escala log-log. O parâmetro permite comparar o potencial de relaxação dos materiais. Aqueles com menor capacidade de relaxação tendem a acumular dano mais rapidamente do que materiais com maior capacidade de relaxação.



Para a caracterização da fadiga das misturas asfálticas, foi realizado o ensaio de tensão direta uniaxial a 10 Hz e 20°C. A análise dos resultados seguiu a abordagem Simplificada do Dano Contínuo Viscoelástico (S-VECD), que integra as curvas de integridade em função do dano ($C \times S$) e de G^R em função do número de ciclos de ruptura. Os parâmetros de fadiga da mistura asfáltica avaliados foram FFM, redução média na pseudo rigidez ao longo do teste até o ponto de ruptura (D^R), e índice de capacidade de dano (S_{app}) (NASCIMENTO, 2015, WANG *et al.*, 2019).

Para a análise de deformação permanente, adotou-se o parâmetro Flow Number (FN), obtido a partir de ensaios de carga repetida uniaxial, conforme a norma DNIT 184 - ME. O FN indica o ciclo no qual inicia-se a zona de deformação permanente terciária, caracterizada pela menor taxa de deformação observada. Paralelamente, o ensaio *Stress Sweep Rutting* (SSR) foi conduzido de acordo com a AASHTO TP134. A partir dos resultados de SSR, foram obtidos parâmetros do chamado *Shift Model*, que visa capturar a influência da tensão desvio, do tempo de carga e da temperatura na deformação permanente das misturas. Adicionalmente, o *Rutting Strain Index* (RSI) foi examinado. O RSI, definido como a proporção entre a deformação permanente acumulada em uma camada asfáltica e a sua espessura ao longo de um período projetado de 20 anos, oferece uma estimativa quantitativa da susceptibilidade da mistura à formação de trilhas de rodas sob condições de tráfego pesado.

RESULTADOS

A partir do espaço Black mostrado na Figura 2, observa-se, a mistura M1 destacou-se por exibir os maiores ângulos de fase máximos, sugerindo uma maior viscosidade relativa. Por outro lado, a mistura M11 demonstrou um padrão distinto, com valores elevados de rigidez mantendo-se constantes mesmo com ângulos de fase similares nas regiões inferiores da curva. Este comportamento singular pode ser explicado pela interação entre o ligante asfáltico e os agregados. É interessante notar no espaço Black que os ângulos de fase máximos das misturas ocorreram em um ponto de rigidez intermediária, aproximadamente 1.500 MPa, sugerindo um equilíbrio entre a contribuição do ligante e dos agregados ao comportamento reológico da mistura.

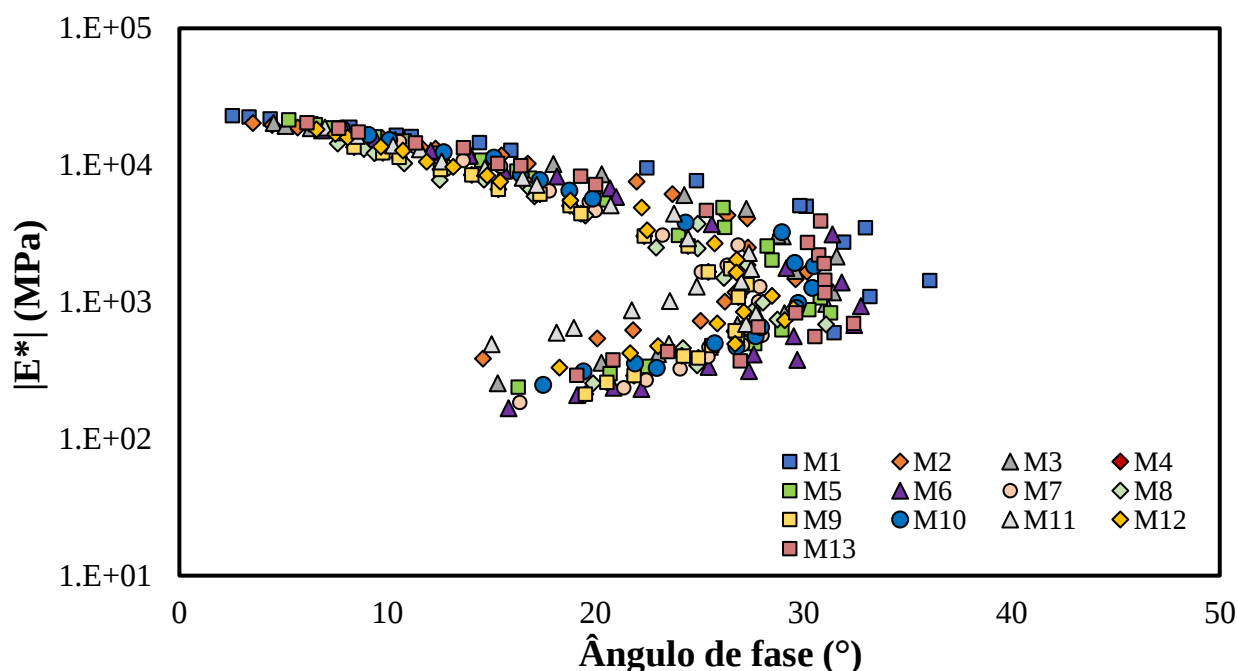


Figura 2: Espaço Black para a misturas analisadas

Os parâmetros G-Rm foram calculados para as misturas asfálticas para condições: 15°C e 5 rad/s; PGLT + 10°C e 0,01666 rad/s; e 20°C e 5 Hz. Os resultados, ilustrados na Figura 3, incluem um ranqueamento para cada mistura com base em seu desempenho sob essas condições. Notavelmente, os ranqueamentos obtidos com as combinações de 15°C e 5 rad/s e 20°C e 5 Hz apresentaram consistência entre si, ao passo que a metodologia empregando a combinação PGLT + 10°C e 0,01666 rad/s resultou em ranqueamentos divergentes. Por exemplo, enquanto a mistura M1 alcançou o mais alto valor de G-Rm nas condições de ensaio de maior temperatura e frequência, na metodologia baseada no PG, ela foi apenas a oitava colocada. Inversamente, a mistura M11 se destacou com o maior valor de G-Rm na segunda metodologia, mas obteve um ranqueamento inferior nas outras combinações.

Essa discrepância pode ser atribuída ao fato de a segunda metodologia adotar temperaturas significativamente mais baixas em comparação com as demais, tornando-a potencialmente mais alinhada à avaliação do desempenho relativo ao trincamento térmico do que à fadiga. Tal variação nos resultados sublinha como a sensibilidade dos parâmetros de desempenho das misturas asfálticas é profundamente afetada pelas condições de temperatura e frequência empregadas nos ensaios.

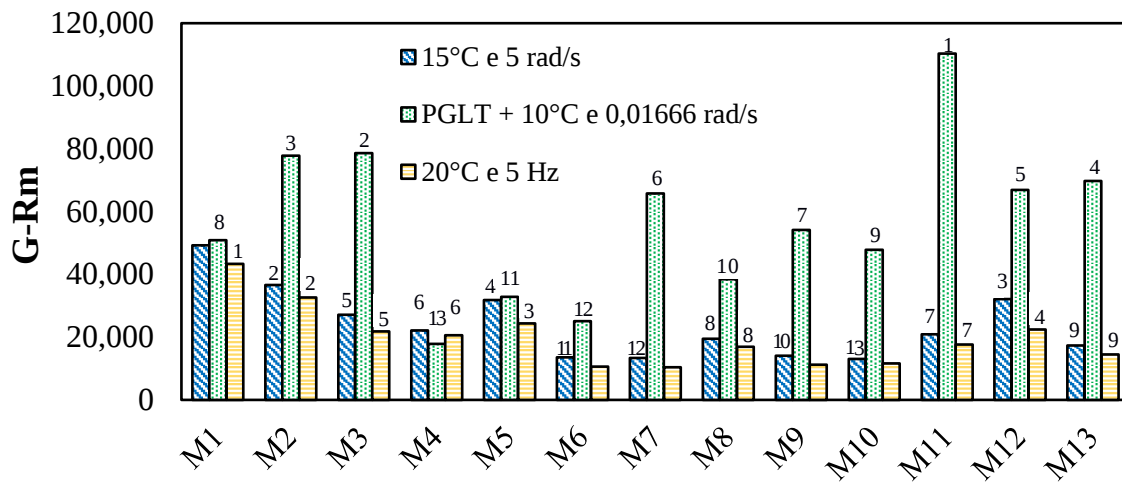


Figura 3: Valores de G-Rm pelos três métodos para as misturas

Para aprofundar a análise de deformação permanente nas misturas asfálticas, foi adotada uma abordagem que se alinha à usada para os ligantes, substituindo o parâmetro $|G^*|/\text{sen}\delta$, obtido a partir de ensaios cíclicos de torção, pelo $|E^*|/\text{sen}\delta$, obtido a partir de ensaios cíclicos uniaxiais. As temperaturas selecionadas para este estudo foram 54°C, correspondente à temperatura máxima registrada durante o ensaio de módulo dinâmico, optando-se conscientemente por não extrapolar além desse ponto, e 40°C, uma temperatura inferior, que ainda se mostrou significativa para observar os efeitos de deformação permanente. A frequência de 1,59 Hz foi escolhida por ser equivalente a 10 rad/s, alinhando-se à frequência utilizada nos ensaios de ligante.

Os resultados desta análise são apresentados na Figura 4, destacando-se os valores do parâmetro para cada uma das misturas. Observou-se uma consistência nos ranqueamentos entre as duas temperaturas analisadas. Interessantemente, as misturas M1, M2 e M11 emergiram como as de maior resistência à deformação permanente, demonstrando os valores mais elevados do parâmetro $|E^*|/\text{sen}\delta$.

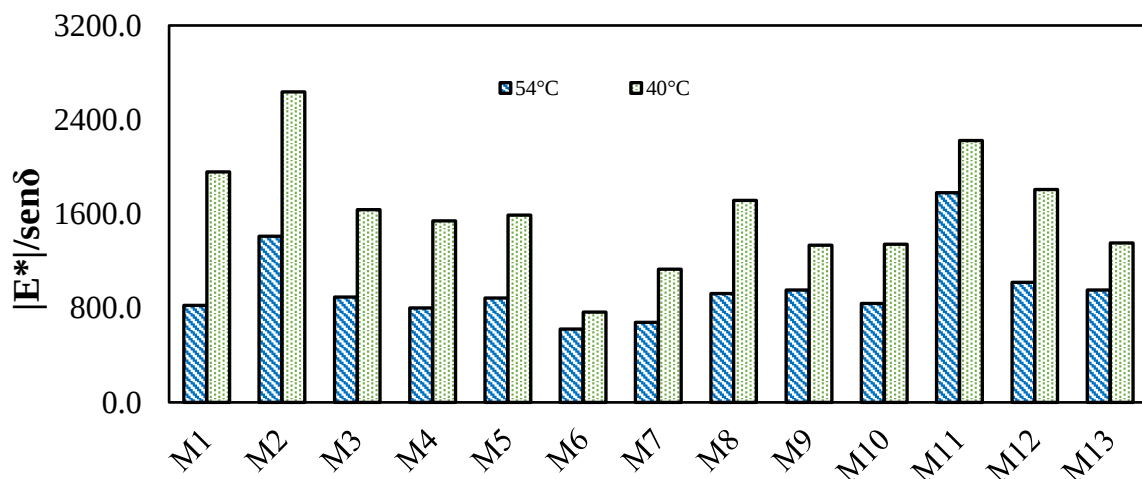


Figura 4: Valores de $|E^*|/\text{sen}\delta$ para as misturas ensaiadas a 40°C e 54°C



Em seguida foram avaliadas as correlações entre os parâmetros analisados e os parâmetros de fadiga e de deformação permanente. A Figura 5 revela que, para 15°C e 5 rad/s, o parâmetro G-Rm se correlaciona de forma moderada e consistente com todos os três parâmetros de fadiga analisados. No entanto, a 20°C e a 5 Hz, observou-se uma correlação levemente inferior com o índice S_{app} . A configuração PGLT + 10°C e 0,01666 rad/s, por sua vez, apresentou as correlações mais fracas.

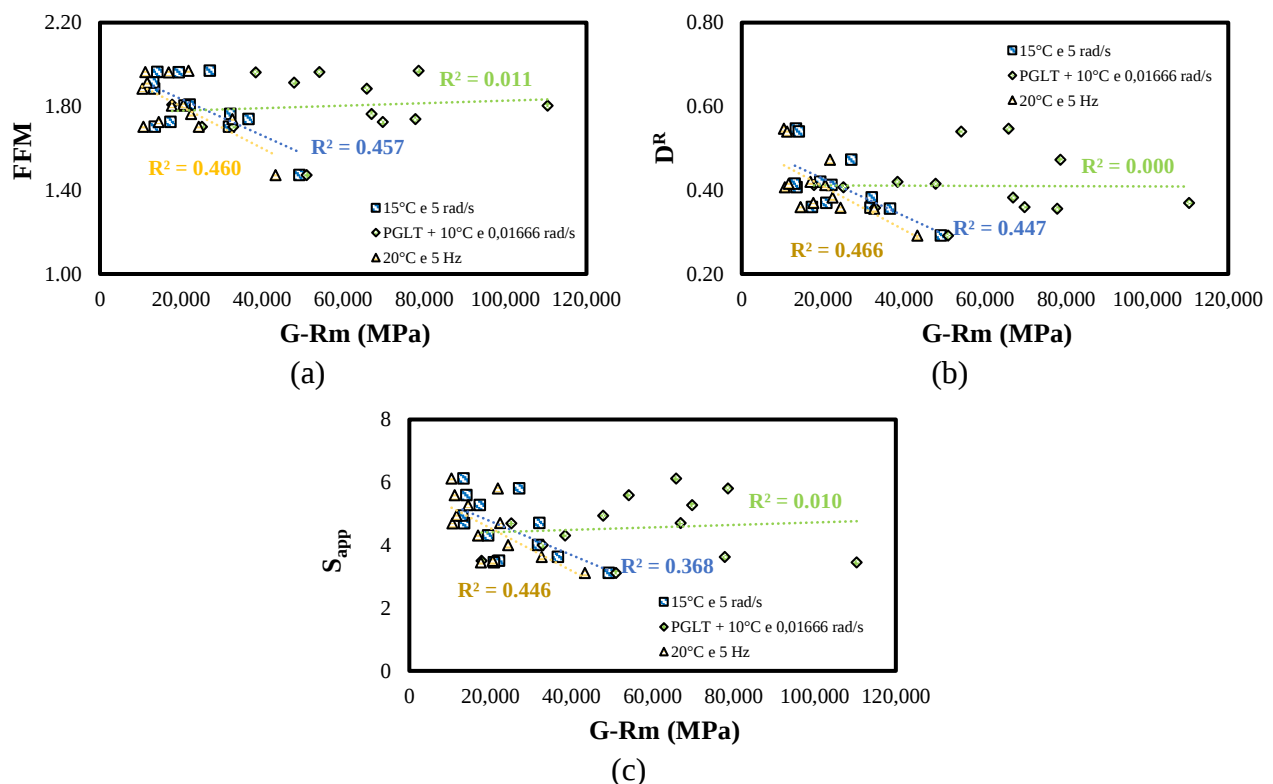


Figura 5: Correlação entre G-Rm com: a) FFM; b) D^R e c) S_{app}

A Figura 6 destaca as relações entre $|E^*|/\sin\delta$ a 54°C e a 40°C e os índices de deformação permanente FN e RSI. Notavelmente, as correlações com o FN se mantiveram similares em ambas as temperaturas avaliadas, com valores intermediários de correlação. Em contraste, o parâmetro RSI mostrou uma correlação mais forte a 40°C do que a 54°C, potencialmente devido à inclusão dos resultados do ensaio SSR a 20°C na sua avaliação, indicando uma sensibilidade a um espectro mais amplo de temperaturas.

Com o objetivo de aprimorar a compreensão dessas correlações, realizou-se a otimização dos coeficientes de correlação (R^2), ajustando as temperaturas e frequências para maximizar o valor de R^2 para cada parâmetro de desempenho. Essa otimização foi realizada utilizando a ferramenta Solver do Excel, com a restrição de manter as condições dentro dos limites experimentais de 4°C a 54°C para temperatura e de 0,1 Hz a 25 Hz para frequência. Os resultados dessa otimização são resumidos na Tabela 2, evidenciando que, para os parâmetros de fadiga, o índice D^R se associou a temperaturas e frequências mais baixas, resultando em valores de G-Rm superiores quando comparado aos índices FFM e S_{app} . Isso sugere que o parâmetro D^R pode ser um indicador mais sensível às condições de



ensaio que resultam em maior rigidez. Comparativamente, FFM e S_{app} apresentaram temperaturas otimizadas similares, mas o FFM mostrou uma ligeira vantagem na correlação com o G-Rm.

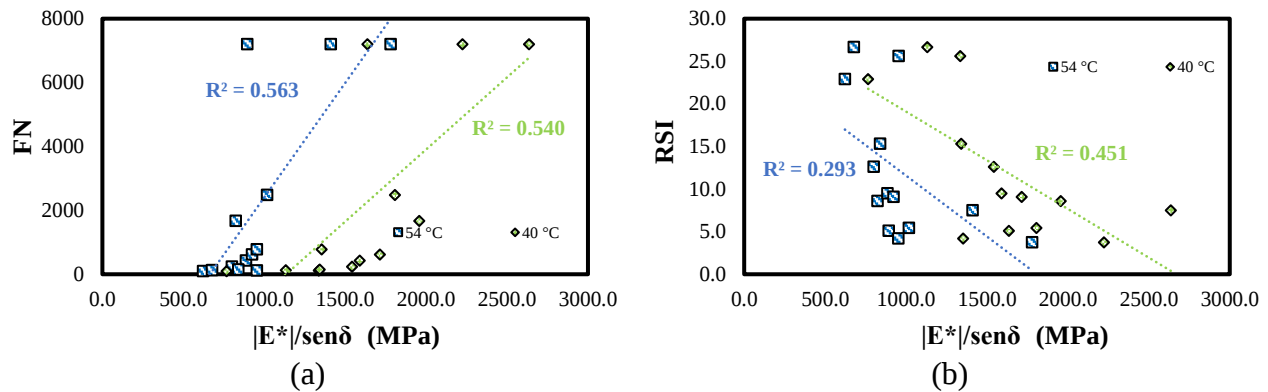


Figura 6: Correlação entre $|E^*|/\text{sen}\delta$ com: a) FN; e b) RSI

Na análise da deformação permanente, identificou-se que o FN se correlacionou melhor com temperaturas mais altas e frequências mais baixas, indicando uma propensão à deformação permanente em misturas com menor rigidez, em contraste com o índice RSI, que demonstrou uma preferência por misturas com valores de rigidez mais elevados.

Tabela 2. Combinações de temperatura e frequência otimizadas e sugeridas para os parâmetros de desempenho

Parâmetro		Otimizada			Sugerida	
		Temp. (°C)	Freq. (Hz)	R^2	Temp. (°C)	Freq. (Hz)
G-Rm	FFM	16,88	5,02	0,536	17,00	5,00
	D^R	6,90	0,55	0,521	7,00	0,50
	S_{app}	17,87	1,72	0,461	18,00	2,00
$ E^* /\text{sen}\delta$	FN	54,00	0,57	0,599	54,00	0,50
	RSI	49,19	11,13	0,509	49,00	10,00

No último segmento de resultados, investigou-se a inclusão do parâmetro alpha (α) na fórmula G-Rm para melhorar as previsões de fadiga, uma vez que é calculado a partir das propriedades viscoelásticas lineares do material. O parâmetro corresponde à taxa de evolução do dano, definida como a máxima inclinação da curva módulo de relaxação vs tempo reduzido, em escala log-log. Foram explorados diferentes modelos de regressão (linear e de potência) e diversas condições de temperatura e frequência. O modelo de potência provou ser mais eficaz na correlação com o FFM. Assim, introduziu-se o GRm- α , descrito pela Equação 3, e os resultados são ilustrados na Figura 7, que mostra valores de FFM e GRm- α , com um R^2 de 0,89, destacando a forte correlação entre os parâmetros. Tais resultados podem indicar o novo parâmetro como uma estimativa inicial do comportamento à fadiga da mistura asfáltica com apenas os dados viscoelásticos lineares.

$$GR_m - \alpha = \left(\frac{|E^*|(\cos \delta)^2}{\text{sen } \delta} \right)^A \times (\alpha)^B \quad (3)$$



Onde: $|E^*|$ e δ são obtidos na temperatura de 20°C e na frequência de 10 Hz; $A = -0,075$ e $B = 0,766$.

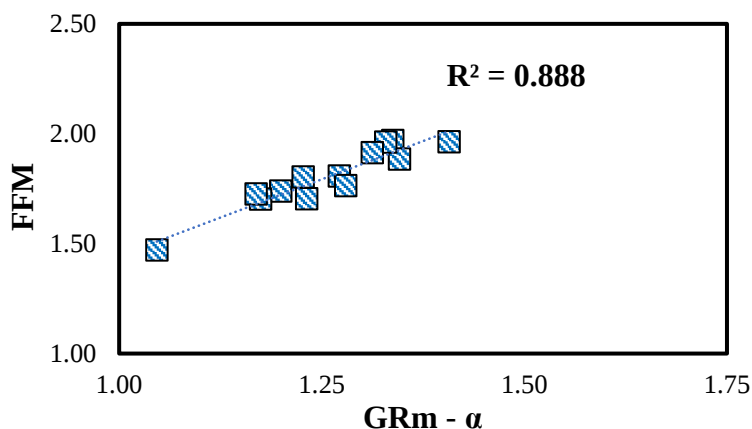


Figura 7: FFM previsto e observado calculado pelo GRm- α

CONCLUSÕES

Neste estudo, foram investigadas as propriedades reológicas de misturas asfálticas sob variadas condições de ensaio, explorando a influência dessas condições nos parâmetros de desempenho relacionados à fadiga e à deformação permanente.

A seleção das condições de ensaio, incluindo temperatura e frequência, tem um impacto significativo na avaliação do desempenho das misturas asfálticas, sugerindo a necessidade de uma escolha criteriosa dessas condições para garantir avaliações precisas. Além disso, identificou-se que o parâmetro G-Rm fornece correlações moderadas a fortes com os indicadores de fadiga e deformação permanente, embora sua eficácia possa variar com as condições específicas de ensaio. Este estudo também revelou que diferentes metodologias de ensaio podem resultar em ranqueamentos variados para as misturas. A otimização das condições de ensaio a partir da análise de correlação sugeriu combinações de temperatura e frequência que podem oferecer as avaliações mais acuradas dos parâmetros de desempenho, destacando a importância de uma abordagem personalizada para cada tipo de análise de desempenho. Por último, um novo parâmetro, GRm- α , foi proposto levando em conta os dados de módulo dinâmico, ângulo de fase e taxa de evolução de dano. Os resultados do novo índice mostraram fortes correlações ($R^2 = 0,89$) com o parâmetro de fadiga FFM.

Essas conclusões sublinham a complexidade inerente à caracterização das misturas asfálticas e a importância de se considerarem nuances de cada metodologia de ensaio para entender adequadamente o comportamento e o desempenho desses materiais em aplicações reais.

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

- Anderson, R.M., King, G.N., Hanson, D.I. and Blankenship, P.B. Evaluation of the relationship between asphalt binder properties and non-load related cracking. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 2011. 80.
- Bahia, H.U. and Anderson, D.A. Strategic highway research program binder rheological parameters: background and comparison with conventional properties. *Transportation research record*, 1995 (1488).
- Christensen, D., Mensching, D., Rowe, G., Anderson, R. M., Hanz, A., Reinke, G., and Anderson, D. Past, present, and future of asphalt binder rheological parameters: Synopsis of 2017 Technical Session 307 at the 96th Annual Meeting of the Transportation Research Board. 2019. *Transportation Research Circular*, (E-C241).
- Glover C. J, Davison R. R, Domke C. H, Ruan Y, Juristyarini P, Knorr D. B, Jung SH. Development of a new method for assessing asphalt binder durability with field validation. *Texas Dept Transport*. 2005 Aug;1872:1-334.
- Habbouche, J., Boz, I. and Diefenderfer, S.D. Validation of performance-based specifications for surface asphalt mixtures in virginia. *Transportation Research Record*, 2022. 2676(5), pp.277-296.
- Kandhal P. S. Low-temperature ductility in relation to pavement performance. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 1977 Jan 1.
- Martin, A. E, Kaseer, F., Arámbula-Mercado, E., Bajaj, A., Daniel, J., Hajj, E., Morian, N. and Ogbo, C. Component materials selection guidelines and evaluation tools for binder blends and mixtures with high recycled materials content and recycling agents. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 2019. 88.
- Martin, A.E., Kaseer, F., Arámbula-Mercado, E., Bajaj, A., Cucalon, L.G., Yin, F., Chowdhury, A., Epps, J., Glover, C., Hajj, E.Y. and Morian, N. Evaluating the effects of recycling agents on asphalt mixtures with high RAS and RAP binder ratios, 2020. (No. Project 09-58).
- Mensching, D.J., Rowe, G.M., Daniel, J.S. and Bennert, T. Exploring low-temperature performance in Black Space. *Road Materials and Pavement Design*, 2015. 16(sup2), pp.230-253.
- Mogawer W.S, Booshehrian A, Vahidi S, Austerman AJ. Evaluating the effect of rejuvenators on the degree of blending and performance of high RAP, RAS, and RAP/RAS mixtures. *Road Materials and Pavement Design*. 2013 Aug 1;14(sup2):193-213.
- Nascimento, L. A. H. Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil. North Carolina State University. Ph.D. Dissertation. 2015.
- Ogbo, C., Kaseer, F., Oshone, M., Sias, J.E. and Martin, A.E. Mixture-based rheological evaluation tool for cracking in asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 2019. 20(sup1), pp.S299-S314.
- Oshone, M., Ghosh, D., Dave, E.V., Daniel, J.S., Voels, J.M. and Dai, S. Effect of mix design variables on thermal cracking performance parameters of asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 2018. 2672(28), pp.471-480.
- Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D.Y. and Kennedy, T.W. Hot mix asphalt materials, mixture design and construction. 2nd Ed., National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation, 1996. Lanham, MD.
- Rowe, G., King, G. and Anderson, M. The influence of binder rheology on the cracking of asphalt mixes in airport and highway projects. *Journal of Testing and Evaluation*, 2014. 42(5), pp.1063-1072.
- Rowe, G.M. and Sharrock, M.J. Cracking of asphalt pavements and the development of specifications with rheological measurements. In 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 2-16. Prague, Czech Republic.
- Wang, Y., & Richard Kim, Y. Development of a pseudo strain energy-based fatigue failure criterion for asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 2019. 20(10), 1182-1192.
- Zhang, R., Huang, J. and Zheng, W. Evaluation of the significance of different mix design variables on asphalt mixtures' cracking performance measured by laboratory performance tests. *Construction and Building Materials*, 2022. 350, p.128693.