

CORRELAÇÃO EM DIFERENTES ESCALAS ENTRE OS PARÂMETROS REOLÓGICOS DOS LIGANTES E O DESEMPENHO EM CAMPO DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

JÉSSICA WANDERLEY SOUZA DO NASCIMENTO¹, SÍLVIO LISBÔA SCHUSTER², CLÉBER FACCIN³, LORENZO CHAVES PACHECO⁴ e LUCIANO PIVOTO SPECHT⁵

¹M.Sc. Pesquisadora Científica Sênior OPTGIS, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, jessica.souza@ufrj.br;

²Dr. em Engenharia Civil, Prof. Adj. GEPPASV, UFSM, Santa Maria-RS, silviolschuster@ufsm.br;

³Engenheiro Civil, Dr. GEPPASV, UFSM, Santa Maria-RS, crfaccin@gmail.com;

⁴Engenheiro Civil, M.Sc. GEPPASV, UFSM, Santa Maria-RS, lorenzochaves70@gmail.com;

⁵Dr. em Engenharia Civil, Prof. Titular GEPPASV, UFSM, Santa Maria-RS, luspecht@ufsm.br

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
6 a 9 de outubro de 2025

RESUMO: O desempenho dos pavimentos asfálticos em campo está diretamente relacionado às propriedades reológicas dos ligantes asfálticos, que são essenciais para garantir a durabilidade e a resistência das estruturas rodoviárias. Baseado nesse contexto, este estudo tem como objetivo investigar a correlação entre as propriedades reológicas dos ligantes e o desempenho em campo das suas respectivas misturas asfálticas densas, abordando diferentes escalas de análise, a fim de compreender como as variações nas propriedades viscoelásticas dos ligantes, tais como módulo complexo, viscosidade e resistência à deformação, influenciam o comportamento dos pavimentos sob condições reais de tráfego e clima. Dentro do escopo delimitado de análise, os resultados indicam que a escolha do ligante asfáltico, com base em suas propriedades reológicas, possui um impacto significativo no desempenho do pavimento, principalmente em relação à resistência à deformação plástica. Essas averiguações contribuem para a melhoria das formulações de misturas asfálticas e o desenvolvimento de diretrizes mais precisas na seleção de ligantes, visando a otimização do desempenho e a vida útil dos pavimentos asfálticos.

PALAVRAS-CHAVE: Deformação permanente, Desempenho do pavimento, Reologia dos ligantes.

SCALE CORRELATION BETWEEN BINDER RHEOLOGICAL PROPERTIES AND ASPHALT PAVEMENT FIELD PERFORMANCE

ABSTRACT: The field performance of asphalt pavements is directly related to the rheological properties of asphalt binders, which are essential to ensure the durability and strength of road structures. In this context, the aim of this study is to investigate the correlation between the rheological properties of binders and the field performance of their respective dense-graded asphalt mixtures, addressing different analysis scales to understand how variations in the binder's viscoelastic properties, such as complex modulus, viscosity, and resistance to deformation, influence pavement behavior under actual traffic and climatic conditions. Within the defined scope of analysis, the results indicate that the selection of the asphalt binder, based on its rheological characteristics, has a significant impact on pavement performance, particularly regarding resistance to permanent deformation. These findings contribute to the improvement of asphalt mixture formulations and the development of more precise guidelines for binder selection, aiming at optimizing performance and extending the service life of asphalt pavements.

KEYWORDS: Permanent deformation, Pavement performance, Binder rheology.

INTRODUÇÃO

O desempenho estrutural e funcional dos pavimentos asfálticos é fortemente condicionado pelas propriedades reológicas dos ligantes que compõem as misturas asfálticas. Essas propriedades, por sua

vez, determinam o comportamento viscoelástico do material sob diferentes condições de carga e temperatura, influenciando diretamente aspectos como deformação permanente, fissuração térmica e fadiga (SHRP, 1993; Bahia et al., 2001; Specht et al., 2017; Schuster et al., 2021; Bernucci et al., 2022; Faccin et al., 2022).

Nos últimos anos, abordagens baseadas em diferentes escalas de análise têm sido amplamente adotadas para investigar a correspondência entre os parâmetros reológicos obtidos em laboratório e o comportamento das misturas asfálticas aplicadas em campo (Park e Schapery, 1999; Olard e Di Benedetto, 2003; Possebon et al., 2021; Vestena et al., 2021, 2024; Nascimento et al., 2025). Dentro desse escopo, ensaios como o MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*) e modelos reológicos avançados, como o 2S2P1D (*2 Springs, 2 Parabolic elements, 1 Dashpot*), têm se destacado por sua capacidade de avaliar parâmetros como o módulo complexo (G^*), o ângulo de fase (δ) e a recuperação elástica, que auxiliam na classificação e seleção adequada de ligantes asfálticos em termos de resistência à deformação e resposta mecânica da mistura (Di Benedetto et al., 2004; Schuster et al., 2022; Faccin et al., 2025).

Nesse cenário, compreender as propriedades viscoelásticas, como módulo complexo, viscosidade e comportamento de fluência, é essencial para prever o desempenho de misturas asfálticas densas sob tráfego real e diferentes condições climáticas (Faccin et al., 2021; Pires et al., 2022; Nascimento, 2023). A correlação entre essas propriedades e os indicadores de desempenho em campo, principalmente a resistência à deformação plástica, possibilita o desenvolvimento de diretrizes mais robustas para a formulação e o controle tecnológico das misturas, contribuindo assim para o aumento da vida útil do pavimento e a eficiência do investimento em infraestrutura viária (Schuster et al., 2023).

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo investigar, por meio de uma abordagem escalar, a correlação entre as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos e o desempenho em campo de suas respectivas misturas densas, estabelecendo relações técnicas consistentes entre os níveis micro e macroscópico, além de consolidar critérios mais robustos para a seleção de ligantes e a sustentabilidade das soluções de pavimentação asfáltica.

MATERIAL E MÉTODOS

Os materiais utilizados neste estudo consistem em misturas asfálticas densas provenientes de obras de restauração e implantação de rodovias executadas no estado do Rio Grande do Sul entre março de 2016 e agosto de 2017. As informações sobre o projeto de dosagem Marshall, características dos ligantes e dados de tráfego foram obtidas junto a órgãos rodoviários e empresas executoras.

Para garantir a preservação das amostras até as etapas de ensaio, as misturas asfálticas densas, moldadas no compactador giratório *Superpave*, foram armazenadas no laboratório do GEPPASV/UFSM na forma de corpos de prova (CPs), visando minimizar os efeitos do envelhecimento oxidativo. As amostras foram envoltas com plástico filme para restringir a exposição ao oxigênio atmosférico e permaneceram acondicionadas até o momento da extração e recuperação dos ligantes.

Posteriormente, a fim de reduzir a influência das zonas mais suscetíveis ao envelhecimento superficial, os núcleos foram extraídos a partir da região central de cada CP utilizando uma máquina extratora rotativa, produzindo espécimes com 110 mm de altura e 50 mm de diâmetro, assegurando maior representatividade do material não envelhecido. Os núcleos extraídos dos CPs com peso aproximado de 700g, coletados diretamente da vibroacabadora antes da execução em campo, foram submetidos ao processo de extração do ligante asfáltico por meio de dissolução em solvente. Essa extração foi realizada em uma centrífuga Rotarex, conforme o procedimento A da norma ASTM D 2172 (2017), promovendo a separação eficiente do ligante da matriz da amostra.

Na etapa seguinte, o fracionamento entre o ligante asfáltico e o solvente foi conduzido aplicando técnicas de destilação no rotaevaporador, baseadas em metodologia adaptada, calibrada e validada por Almeida Jr. (2022) em sua tese de doutorado, fundamentada nos princípios estabelecidos na norma ASTM D 5404 (2017).

As caracterizações reológicas e de desempenho foram realizadas utilizando o Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR) com placas paralelas, fabricado pela Anton Paar, modelo EC-Twist 502. Inicialmente, o módulo de cisalhamento dinâmico $|G^*|$ e o ângulo de fase (δ), conforme a normativa AASHTO T 315 (2019), foram determinados para diferentes temperaturas entre 5°C e 65°C, aplicando cargas de 25 frequências em rampa linear de 0,1 a 30 Hz. Para assegurar a qualidade dos dados em diferentes intervalos de temperatura, foram adotadas geometrias específicas: placas de 8 mm e *gap* de 2 mm para temperaturas abaixo de 35°C; e placas de 25 mm com *gap* de 1 mm para temperaturas acima disso, segundo recomendado pela especificação.

A fim de obter os dados Jnr, foi realizado o teste *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR) a uma temperatura fixa de 64°C, conforme fatores climáticos locais, estabelecidos em conformidade com a normativa AASHTO T 350 (2019), com o intuito de medir a deformação permanente dos ligantes asfálticos extraídos e recuperados. Além deste, o teste de *Performance Grade* (PG) foi realizado para determinar a sua classificação em termos de tipo de tráfego. É importante pontuar que, o teste MSCR deve ser realizado de acordo com a temperatura PG a alta temperatura, baseado na especificação da AASHTO M 332 (2019), garantindo a avaliação do comportamento térmico de acordo com o método *Superpave*.

No que diz respeito aos segmentos monitorados, um total de 11 trechos de rodovias estaduais foram inspecionados quanto à evolução do Afundamento em Trilha de Roda (ATR), com o apoio de um sistema de posicionamento geográfico para o mapeamento preciso das áreas analisadas.

Por fim, os parâmetros reológicos obtidos na escala do ligante, extraído e recuperado de suas respectivas misturas asfálticas densas, foram correlacionados com os indicadores de desempenho em campo, considerando três relações principais: (i) $Jnr_{3,2} \times ATR$; (ii) $|G^*| \times ATR$; e (iii) $|G^*|/\text{sen}\delta \times ATR$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados indicam que os ligantes convencionais extraídos e recuperados de suas respectivas misturas asfálticas, em sua maioria, apresentaram maior suscetibilidade à deformação permanente em altas temperaturas, sendo classificados para tráfego do tipo padrão (S), com exceção das amostras U1-NMAS9.5-50/70, U2-NMAS19-50/70, U4-NMAS19-50/70AB e U8-NMAS19-50/70AB, que se enquadraram na categoria de tráfego pesado (H), evidenciando disparidades no desempenho entre os ligantes convencionais. Quanto às amostras modificadas recuperadas, atenderam a todas as categorias de tráfego, evidenciando maior resistência às solicitações térmicas. Isso se deve ao fato de que, quanto maior a modificação dos ligantes asfálticos, menor é o seu limite de deterioração em termos de deformação permanente e, em consequência, resistem a uma categoria mais elevada de tráfego sob altas temperaturas. Em vista do exposto, fica evidente que as disparidades observadas ressaltam a importância da caracterização individualizada dos ligantes.

Na sequência da análise, verificou-se que a relação entre o parâmetro $Jnr_{3,2}$ e as medições de Afundamento em Trilha de Roda (ATR) obtidas nos segmentos monitorados apresentou uma boa correlação negativa, uma vez que a inclinação da tendência foi inversa à prevista teoricamente. Em condições ideais, valores reduzidos de $Jnr_{3,2}$ indicariam maior capacidade de recuperação elástica e, conseqüentemente, menores valores de ATR. No entanto, em condições reais de campo, fatores como heterogeneidades construtivas, variações ambientais, diferenças na macrotextura das misturas asfálticas e as faixas do tipo de tráfego podem ter influenciado significativamente o desempenho, culminando em um comportamento divergente (Figura 1).

Ao correlacionar o módulo complexo $|G^*|$ dos ligantes, determinado a 65°C e frequência de 1 Hz, com os valores de ATR, observou-se uma boa relação em termos de coeficiente de determinação (R^2), evidenciando uma associação consistente entre a rigidez reológica do ligante e seu desempenho frente à deformação permanente. A tendência observada denota que ligantes com maiores valores de $|G^*|$ apresentam menores valores de ATR, em consonância com estudos reportados na literatura (SHRP, 1993; Bahia et al., 2001), os quais indicam que uma maior rigidez do ligante contribui para reduzir a suscetibilidade ao fluxo plástico sob carregamentos repetidos. Esses resultados (Figura 2)

reforçam que ligantes com maior rigidez dinâmica tendem a maior resistência ao afundamento da pista e, conseqüentemente, melhor desempenho em condições reais de campo.

Figura 1. Correlação entre J_{nr} e ATR: (a) Convencional; (b) Modificado.

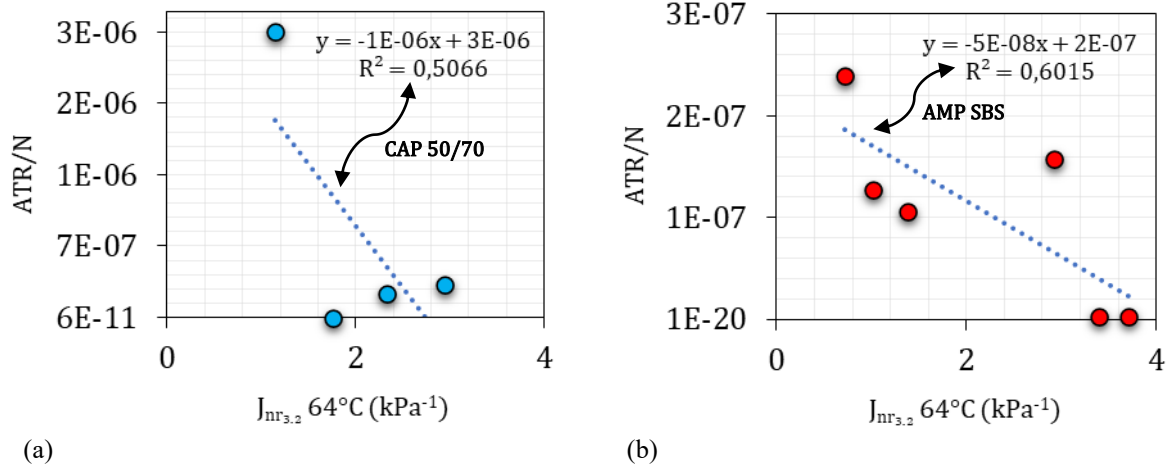


Figura 2. Correlação entre $|G^*|$ 65°C 1Hz e ATR: (a) Convencional; (b) Modificado.

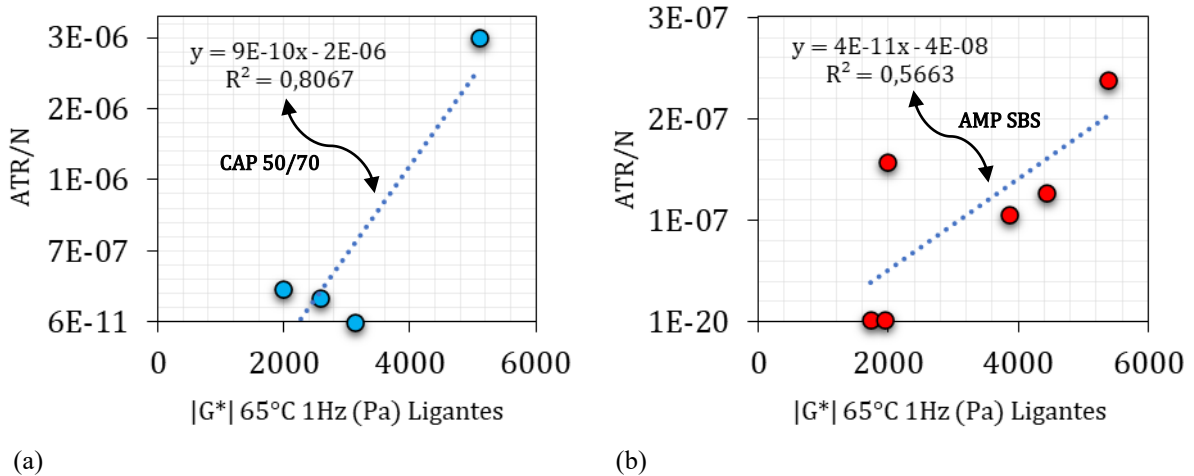
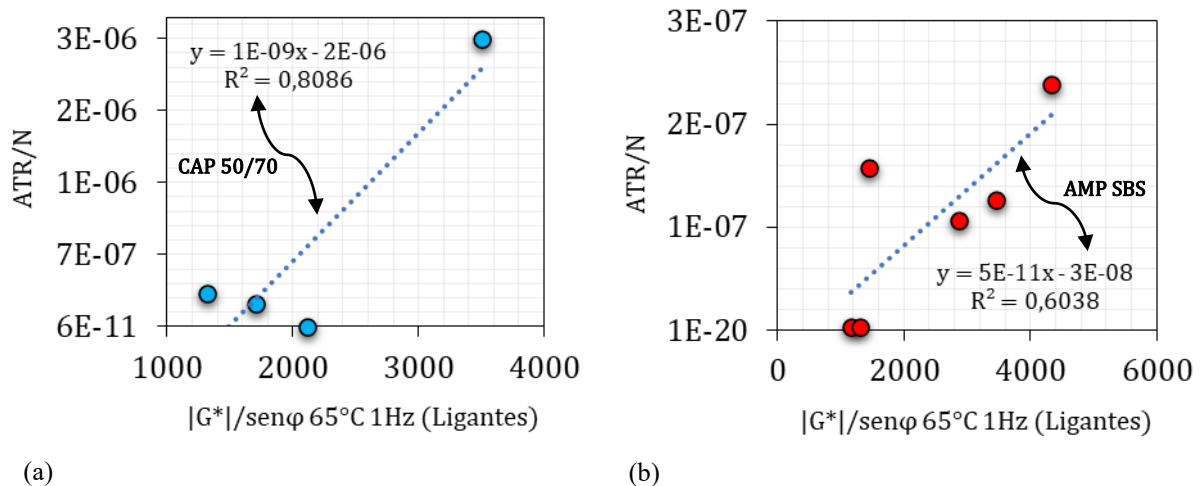


Figura 3. Correlação entre $|G^*|/\text{sen}\delta$ 65°C 1Hz e ATR: (a) Convencional; (b) Modificado.



Por fim, a correlação entre o parâmetro $|G^*|/\text{sen}\delta$, também obtido a 65°C e a uma frequência de 1 Hz, e os valores de ATR evidenciou uma correlação ainda mais forte, reforçando que a resposta conjunta da rigidez e do ângulo de fase é um indicador mais sensível do desempenho frente à deformação permanente. Essa métrica integra a resistência ao cisalhamento com a capacidade de resposta elástica do ligante, sendo amplamente reconhecida na literatura como um preditor robusto do comportamento sob condições de tráfego severas (Figura 3).

CONCLUSÃO

Conclui-se que a correlação entre os parâmetros reológicos na escala do ligante e o Afundamento em Trilha de Roda (ATR) evidenciou que as métricas combinadas, como $|G|/\text{sen}\delta$, têm maior poder preditivo do que os parâmetros isolados, principalmente sob altas temperaturas e carregamentos repetidos. A integração dos resultados laboratoriais com o desempenho real das misturas reforça a eficácia da abordagem escalar como uma ferramenta para previsão e otimização da resistência à deformação permanente em pavimentos asfálticos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ANP, à Petrobras, ao CNPq, à CAPES, ao DNIT, ao GEPPASV/UFSM e ao OPTGIS da COPPE/UFRJ pelo apoio institucional, financeiro e técnico.

REFERÊNCIAS

- Faccin, C. et al. Flow Number parameter as a performance criteria for asphalt mixtures rutting: evaluation to mixes Applied in Brazil Southern region. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 23, n. 9, p. 3055-3067, 2021.
- Faccin, C. et al. Análise estatística de séries de temperatura do ar da reanálise Merra-2: estudo de caso – Rio Grande do Sul. *Anais do 36º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, p. 1-12, 2022.
- Faccin, C. et al. Seleção de ligantes asfálticos com base na metodologia Superpave-PG para o estado do Rio Grande do Sul. *Revista ENINFRA*, v. 4, n. 4, p. 72-94, 2025.
- Nascimento, J. W. S. do. Estudo entre escalas de ligantes e misturas: investigação do comportamento viscoelástico linear e parâmetros de dano dos materiais asfálticos. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023.*
- Nascimento, J. W. S. do. et al. Investigação do comportamento viscoelástico linear entre as escalas de ligantes e misturas asfálticas por meio do modelo reológico 2S2P1D. *Anais do 27º ENACOR - 50ª RAPv*, 2025.
- Pires, D. M. et al. Study of the permanent deformation of asphalt mixtures in the field: A multiscale approach. *Construction and Building Materials*, v. 325, 2022.
- Possebon, E. P. et al. Rheological properties, 2S2P1D modelling and SHStS transformation of 12 Brazilian bitumens and mixtures, *Road Materials and Pavement Design*, v. 23, p. 68-85, 2021.
- Schuster, S. L. et al. Fatigue behaviour of plant produced asphalt mixtures through viscoelastic continuum damage model. *Road Materials and Pavement Design*, v. 24, n. 1, p. 59-85, 2021.
- Schuster, S. L. et al. Impacto das mudanças climáticas na seleção de ligantes asfálticos no Brasil considerando o grau de desempenho (PG). *Anais do Rio Oil & Gas Expo and Conference*, n. 89, 2022.
- Schuster, S. L. et al. Construction quality impact in asphalt pavements cost: a framework based on air voids, linear viscoelastic and fatigue behaviour. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 24, n. 1, 2023.
- Specht, L. P. et al. Application of the theory of viscoelasticity to evaluate the resilient modulus test in asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, v. 149, p. 648-658, 2017.
- Vestena, P. M. et al. Comparação de rigidez entre misturas asfálticas produzidas em usina e laboratório utilizando o modelo 2S2P1D. *Anais do 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, v. 1, p. 956-967, 2021.
- Vestena, P. M. et al. Advanced characterization of lab-produced vs. plant-produced asphalt mixtures from Southern Brazil. *Construction and Building Materials*, v. 456, 2024.