

ANÁLISE DE PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE LIGANTES MODIFICADOS COM MONTMORILONITA PURA E ORGANOFILIZADA

Brenda Maria Barreto de Souza¹;

¹Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB.

<http://lattes.cnpq.br/3914917823761276>

Auanny Alícia Alves da Silva²;

²Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB.

<http://lattes.cnpq.br/6656009178198385>

Thiago Lucena Dias³;

³Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB.

<http://lattes.cnpq.br/0874483648113887>

Ranykelly Kevely Florentino de Oliveira⁴;

⁴Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB.

<http://lattes.cnpq.br/6898892371295906>

Vitor Braga de Azevedo⁵;

⁵Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB.

<http://lattes.cnpq.br/9370085591851452>

Luana Dantas de Medeiros⁶;

⁶Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB.

<http://lattes.cnpq.br/3470183910336431>

Renan Camilo de Lima Paulo⁷;

⁷Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB.

<http://lattes.cnpq.br/2927689646852208>

Ana Maria Gonçalves Duarte⁸;

⁸Universidade de Pernambuco (UPE), Nazaré da Mata, PE.

<http://lattes.cnpq.br/7613871386733779>

Diego José Araújo Viégas⁹;

⁹Universidade de Pernambuco (UPE), Recife, PE.

<http://lattes.cnpq.br/6572037012477821>

Yêda Vieira Póvoas¹⁰;

¹⁰Universidade de Pernambuco (UPE), Recife, PE.

<http://lattes.cnpq.br/1092873948823400>

Edmilson Dantas da Silva Filho¹¹.

¹¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Campina Grande, PB.

<http://lattes.cnpq.br/3559366120005724>

RESUMO: Este estudo investigou o comportamento reológico do ligante asfáltico CAP 50/70 modificado com montmorilonita organofilizada por dois agentes distintos, cloreto de estearil dimetil amônio (Praepagen WB) e cloreto de cetil trimetil amônio (GENAMIN), visando melhorar o desempenho mecânico e a durabilidade dos pavimentos frente aos problemas associados à deformação permanente, fadiga e envelhecimento do ligante. A metodologia consistiu na incorporação dos modificadores em teores de 2%, 3%, 4% e 5%, seguida da realização de ensaios reológicos para avaliação do desempenho dos ligantes modificados. Os resultados mostraram que a adição dos modificadores promoveu alterações nas propriedades reológicas do CAP 50/70, com destaque para o aumento da viscosidade e da rigidez do material. O GENAMIN apresentou comportamento mais expressivo, sobretudo no teor de 5%, resultando em maior incremento da viscosidade comparativamente ao Praepagen WB. Também foram observados ganhos quanto à resistência ao envelhecimento a curto prazo e melhoria das propriedades elásticas, evidenciadas pela redução do ângulo de fase e pelo desempenho do ensaio MSCR. Os resultados indicam potencial do GENAMIN como modificador capaz de promover melhorias reológicas mais expressivas ao ligante asfáltico.

PALAVRAS-CHAVE: Nanomateriais. Grau de desempenho. MSCR.

ANALYSIS OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF BINDERS MODIFIED WITH PURE AND ORGANOPHILIZED MONTMORILLONITE

ABSTRACT: This study investigated the rheological behavior of CAP 50/70 asphalt binder modified with montmorillonite organophilized using two different agents, stearyl dimethyl ammonium chloride (Preapagen WB) and cetyl trimethyl ammonium chloride (GENAMIN), aiming to improve the mechanical performance and durability of pavements against issues associated with permanent deformation, fatigue, and binder aging. The methodology consisted of incorporating the modifiers at contents of 2%, 3%, and 5%, followed by rheological tests to evaluate the performance of the modified binders. The results showed that the addition of modifiers promoted changes in the rheological properties of CAP 50/70, particularly increasing the viscosity and stiffness of the material. GENAMIN exhibited a more pronounced behavior, especially at the 5% content, resulting in a greater increase in viscosity

compared to Preapagen WB. Improvements were also observed regarding short-term aging resistance and enhanced elastic properties, as evidenced by the reduction in phase angle and the performance in the MSCR test. The results indicate the potential of GENAMIN as a modifier capable of promoting more significant rheological improvements in asphalt binders.

KEY-WORDS: Nanomaterials. Performance Grade. MSCR.

INTRODUÇÃO

A infraestrutura de transportes rodoviários desempenha papel essencial no desenvolvimento socioeconômico, sendo responsável pelo escoamento de cargas e integração territorial em escala global. Nesse contexto, os pavimentos asfálticos devem apresentar elevada durabilidade e resistência frente ao aumento do tráfego pesado e às variações climáticas severas.

Apesar disso, nota-se que os revestimentos produzidos com Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) convencionalmente apresentam limitações relacionadas ao envelhecimento termo-oxidativo, aspecto provocado pela ação conjunta do oxigênio e da temperatura durante a produção, aplicação e vida útil do pavimento. Esse processo promove alterações químicas nas frações do ligante, especialmente a conversão de componentes maltênicos em asfaltenos, resultando no aumento da instabilidade, perda de flexibilidade e maior susceptibilidade ao aparecimento de deformações permanentes e trincas por fadiga (Petersen, 2009; Chen *et al.*, 2023).

Diante desse problema, a nanotecnologia aplicada à pavimentação asfáltica tem despertado crescente interesse científico devido ao potencial de melhoria das propriedades físicas, químicas e reológicas dos ligantes. Entre os nanomateriais mais promissores destacam-se os filossilicatos do tipo 2:1, especialmente a argila montmorilonita (MMT), caracterizada por sua elevada área superficial e estrutura lamelar. Contudo, em seu estado natural, o MMT apresenta caráter hidrofílico, dificultando sua compatibilidade com matrizes orgânicas hidrofóbicas, como o CAP (De Paiva *et al.*, 2008). Para superar essa limitação, realiza-se o processo de organofilização, no qual cátions inorgânicos presentes entre as lamelas da argila são substituídas por sais quaternários de amônio, promovendo o aumento do espaçamento basal e favorecendo a interação com o ligante asfáltico (Vargas *et al.*, 2017).

A dispersão adequada das nanoplaquetas de montmorilonita na matriz asfáltica possibilita a formação de estruturas intercaladas ou esfoliadas, capazes de atuar como barreiras físicas à difusão de oxigênio e à volatilização dos componentes leves do asfalto. Como consequência, ocorre redução da taxa de envelhecimento termo-oxidativo e melhoria significativa das propriedades reológicas e mecânicas do ligante (Yadykova; Ilyin, 2023).

Além disso, parâmetros obtidos por meio do Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR), como o módulo complexo (G^*) e o ângulo de fase (δ), permitem avaliar o ganho de

elasticidade e a resistência à fadiga e à deformação permanente dos ligantes modificados (Airey, 2003). Assim, o estudo da incorporação de nanoargilas organofílicas em ligantes asfálticos representa uma estratégia para o desenvolvimento de pavimentos alinhados aos princípios de sustentabilidade e eficiência tecnológica da infraestrutura moderna.

OBJETIVO

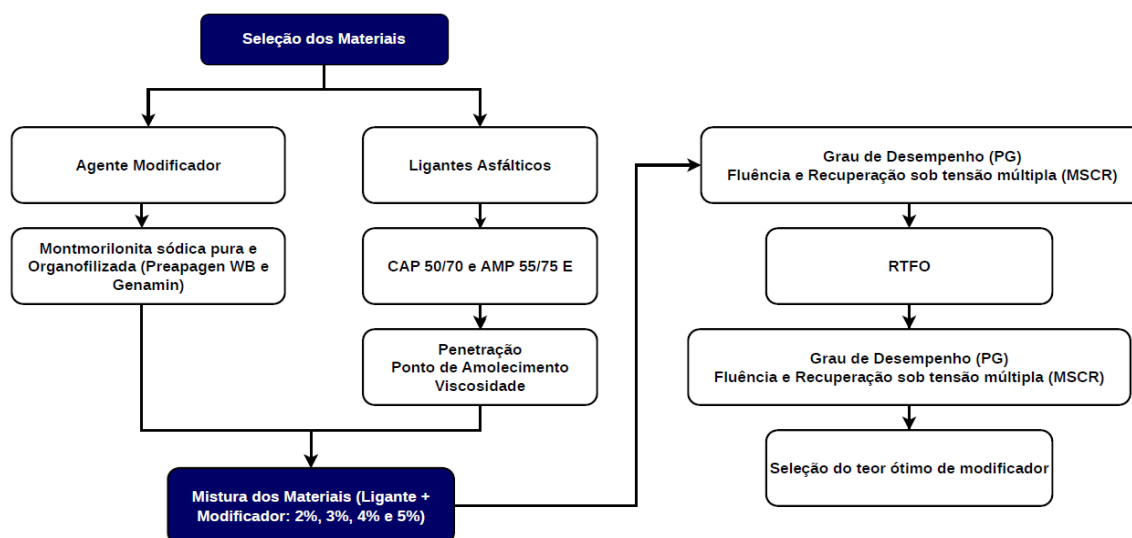
Analisar as propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados com montmorilonita pura e organofilizada com os sais Praepagen WB e Genamin, avaliando a influência dessas modificações no comportamento mecânico, na susceptibilidade térmica e no desempenho do ligante frente às condições de envelhecimento e deformação.

METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo experimental, de abordagem quantitativa e natureza aplicada, desenvolvido com o objetivo de avaliar a influência da incorporação da cinza de algaroba no comportamento mecânico de misturas solo-cinza submetidas a diferentes teores de adição e períodos de cura, por meio da realização de ensaios físicos, mineralógicos e mecânicos voltados à análise da resistência e da viabilidade técnica do material estabilizado.

A Figura 1 apresenta o fluxograma geral da pesquisa, contendo as principais etapas para determinação das propriedades reológicas do ligante modificado.

Figura 1: Fluxograma geral da pesquisa.



Fonte: Os autores (2026).

Materiais

Os materiais empregados nessa pesquisa foram o ligante asfáltico CAP 50/70 doado pela Empresa de Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste – LUBNOR; o ligante asfáltico 55/75 E disponibilizado pela JBR Engenharia, bem como os modificadores argila montmorilonita sódica pura (MMT - Montmorillonita) e a argila montmorilonita organofilizada com o Praepagen WB (cloreto de estearil dimetil amônio-P (OMMTWB) e com o GENAMIN (cloreto de cetil trimetil amônio – G – OMMT-G).

Métodos

A modificação do ligante asfáltico CAP 50/70 foi realizada no Laboratório de Tecnologia dos Materiais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Este procedimento consistiu em adicionar ao CAP 50/70 os teores de 2%, 3%, 4% e 5% da Montmorilonita pura e da Montmorilonita organofilizada com o sal Praepagen WB e Genamin sob agitação mecânica a 400 rpm por 30 minutos à temperatura de $150^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, de modo que as misturas apresentassem ausência de grumos e homogeneidade.

Posteriormente, para cada modificação com seus respectivos teores foram realizados os ensaios de penetração (DNIT-ME 155/2010), ponto de amolecimento (DNIT-ME 131/2010) e viscosidade rotacional Brookfield (NBR 15184/2004), realizados antes e após o método de envelhecimento a curto prazo em estufa (RTFO), segundo o método (ASTM D2872).

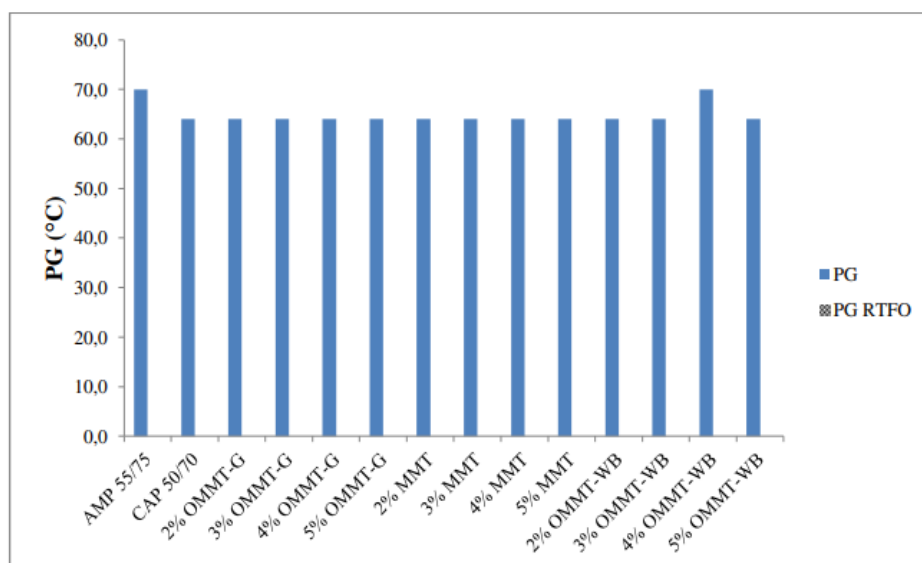
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Grau de desempenho

Os resultados, como mostrado na Figura 2, indicam que as modificações propostas não alteraram o grau de desempenho (*Performance Grade* - PG) nominal do ligante asfáltico, mantendo constantes as temperaturas máximas antes e após o envelhecimento a curto prazo.

A análise do parâmetro viscoelástico $G^*/\sin\delta$ confirmou que os agentes modificadores não degradam a qualidade do ligante original e não comprometeram sua rigidez e resistência à deformação permanente sob elevadas temperaturas, evidenciando estabilidade frente ao efeito oxidativo. A única flutuação pontual ocorreu na composição com 4% de WB, sem impacto no PG final.

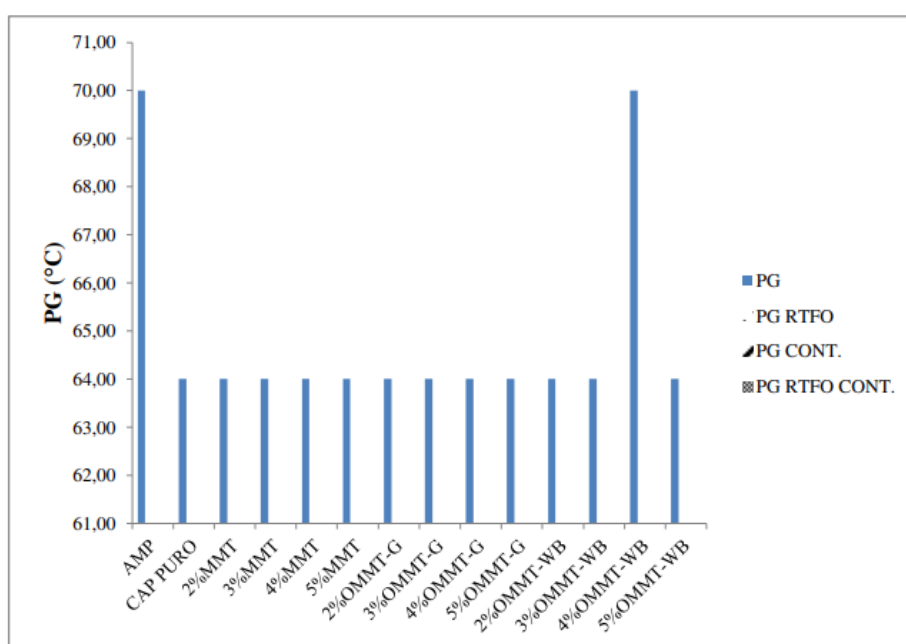
Figura 2: Temperaturas máximas de PG para os ligantes asfálticos em estudo



Fonte: Os autores (2026).

Em contrapartida, o ligante polimérico (AMP 55/75) exibiu redução na temperatura do PG contínuo antes do envelhecimento, indicando maior vulnerabilidade inicial à oxidação térmica, embora tenha se equiparado ao CAP puro e às demais composições após o RTFO. Por fim, ressalta-se que os intervalos normativos de 6 °C limitam uma avaliação sutil do material, justificando a relevância da análise do grau de desempenho contínuo (Figura 3) para compreender com precisão a evolução dessas propriedades.

Figura 3: Grau de Desempenho Contínuo.



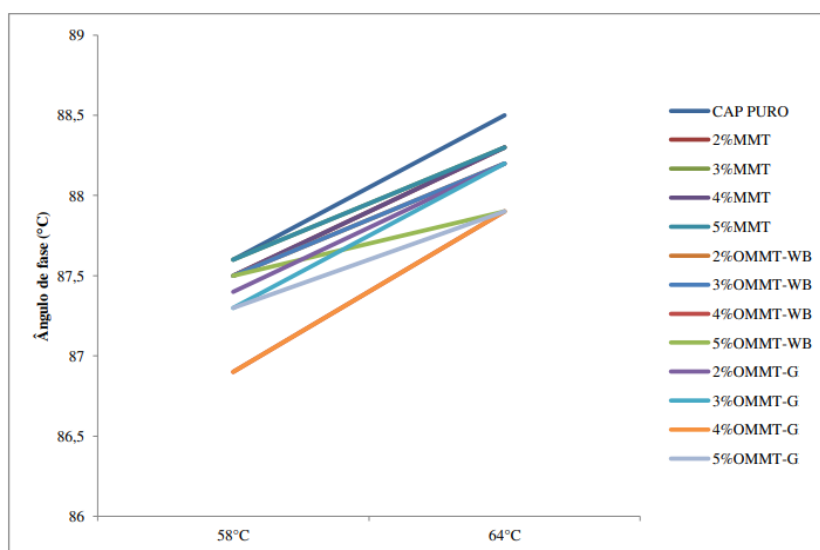
Fonte: Os autores (2026).

Ângulo de fase

O ângulo de fase é um parâmetro viscoelástico obtido concomitantemente com o PG, foi avaliado para caracterizar a sensibilidade térmica e o comportamento reológico dos ligantes asfálticos.

A Figura 4 ilustra os valores de ângulo de fase registrados para as diferentes composições sob as temperaturas de ensaio de 58 °C e 64 °C, permitindo analisar a proporção entre os componentes elásticos e viscosos do material diante do incremento térmico e da incorporação dos modificadores.

Figura 4: Ângulo de fase para as temperaturas de 58 e 64 °C.



Fonte: Os autores (2026).

Os valores do ângulo de fase (δ) das amostras modificadas mantiveram-se próximos aos do CAP 50/70, confirmando a natureza não reativa dos aditivos e a preservação da integridade do ligante. Contudo, as composições com 4% de WB e GNM registraram os menores valores de δ , indicando um sutil ganho de elasticidade. Conforme Airey (2003), esse comportamento ocorre porque a redução da viscosidade do ligante sob altas temperaturas favorece a influência da rede elástica do modificador nas propriedades reológicas globais do sistema.

Fluência e recuperação sobre tensão múltipla – MSCR

A compreensão da dependência tempo-temperatura sob tensões elevadas é fundamental para a caracterização de ligantes asfálticos modificados, cuja resposta mecânica se apresenta mais complexa.

Nesse contexto, os parâmetros de porcentagem de recuperação elástica (%Rec ou %R) e compliância não recuperável (Jnr), obtidos via ensaio de Fluência e Recuperação sob Tensão Múltipla (MSCR), consolidam-se como ferramentas eficazes para otimizar o teor de modificador, como mostra na Tabela 1.

Tabela 1: Percentuais de recuperação.

Amostra	Porcentagem de recuperação elástica (%R)		
	100 Pa	3200 Pa	Rdiff
CAP 50/70	0,20	0,10	34,80
2% MMT	0,50	0,20	54,80
3% MMT	0,50	0,10	78,50
4% MMT	0,80	0,20	72,60
5% MMT	0,70	0,40	44,80
2% OMMT-WB	1,90	0,20	89,40
3% OMMT-WB	0,80	0,10	89,10
4% OMMT-WB	0,20	0,20	9,70
5% OMMT-WB	0,80	0,00	94,80
2% OMMT-G	0,50	0,10	81,30
3% OMMT-G	0,20	0,00	81,30
4% OMMT-G	0,70	0,10	82,20
5% OMMT-G	0,60	0,00	92,40

Fonte: Os autores (2026).

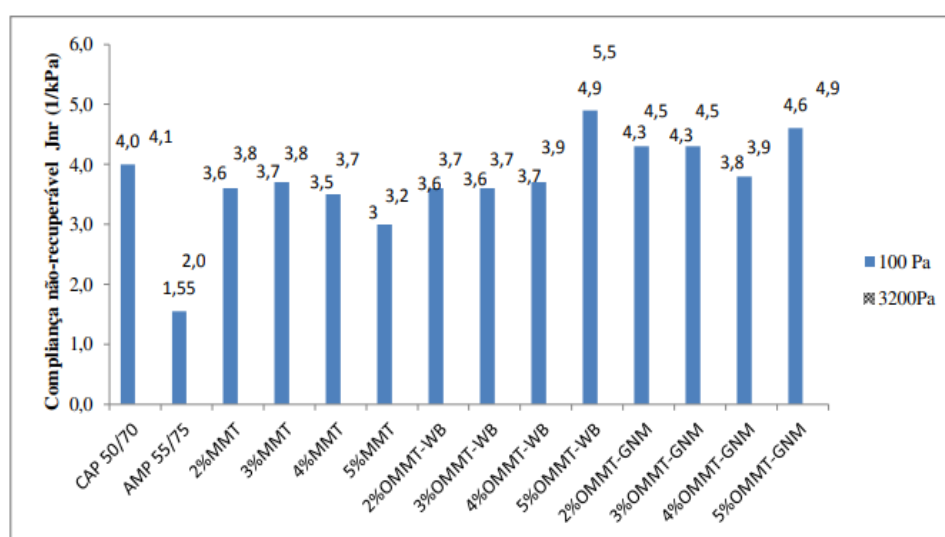
Os ensaios de MSCR demonstraram que os ligantes modificados apresentaram ganhos pouco significativos nas propriedades elásticas sob tensão de 100 Pa, comportamento também observado sob 3200 Pa, indicando similaridade de resposta mecânica entre as amostras. Os resultados de Rdiff evidenciaram elevada sensibilidade dos ligantes modificados ao aumento do carregamento, com maiores perdas de recuperação elástica em relação ao ligante de referência.

Os resultados de compliância não recuperável (Jnr), como apresenta na Tabela 2, indicaram a suscetibilidade dos ligantes à deformação permanente, enquanto a análise comparativa sob tensões de 100 Pa e 3200 Pa (Figura 5) permitiu avaliar a influência dos modificadores no comportamento mecânico dos materiais sob condições críticas de carregamento.

Tabela 2: Valores obtidos para compliância.

Amostra	Compliância não recuperável (Jnr) – Kpa ⁻¹		
	100 Pa	3200 Pa	Jnr, diff (%)
CAP 50/70	4,00	4,10	3,70
AMP 55/75	1,55	2,00	0,29
2% MMT	3,60	3,80	4,10
3% MMT	3,70	3,80	2,30
4% MMT	3,50	3,70	4,30
5% MMT	3,00	3,20	4,70
2% OMMT-WB	3,60	3,70	5,40
3% OMMT-WB	3,60	3,70	6,70
4% OMMT-WB	3,70	3,90	4,20
5% OMMT-WB	4,90	5,50	12,20
2% OMMT-G	4,30	4,50	3,90
3% OMMT-G	4,30	4,50	3,90
4% OMMT-G	3,80	3,90	5,40
5% OMMT-G	4,60	4,90	7,00

Fonte: Os autores (2026).

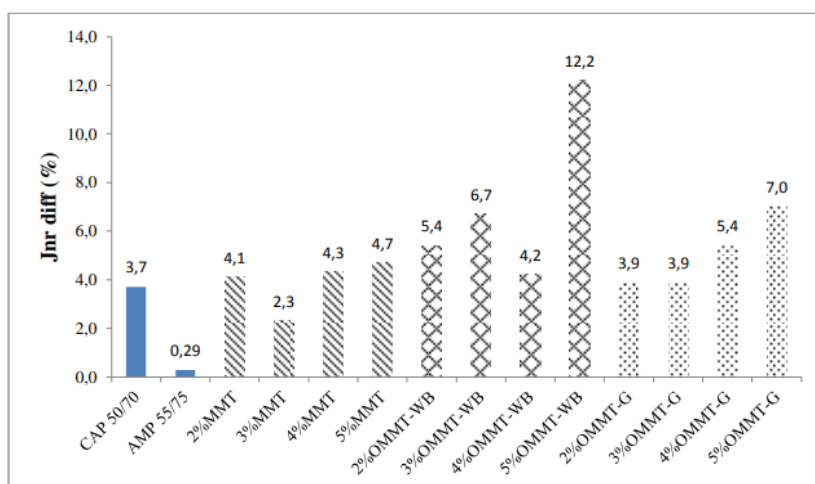
Figura 5: Compliância não recuperável (Jnr) a 100 Pa e 3200 Pa.

Fonte: Os autores (2026).

Os resultados de MSCR demonstraram que os ligantes modificados apresentaram comportamento mecânico semelhante ao ligante de referência sob elevadas tensões, porém com maior perda de recuperação elástica à medida que o carregamento aumentou. A análise da compliância não recuperável (Jnr) indicou a susceptibilidade dos ligantes à deformação permanente em altas temperaturas, sendo que menores valores de Jnr refletem maior estabilidade mecânica do material.

Além disso, os resultados de Jnr,diff mostraram a sensibilidade dos ligantes às variações de carga, conforme os critérios estabelecidos pela AASHTO MP 19. Na Figura 6 mostra que os valores obtidos permitiram avaliar a capacidade dos modificadores em minimizar os efeitos do aumento de tensão, contribuindo para melhor desempenho dos ligantes sob condições severas de tráfego.

Figura 6: Diferenças percentuais em complianças não recuperáveis (Jnr,diff %) dos ligantes asfálticos.



Fonte: Os autores (2026).

Com exceção da amostra com 5% de WB, os ligantes modificados apresentaram valores de Jnr,diff inferiores a 10%, indicando preservação das propriedades reológicas e baixa sensibilidade às variações de tensão. A incorporação de MMT, WB e 4% de GNM reduziu os valores de Jnr, enquadrando os materiais nos limites de tráfego recomendados pela FHWA e aumentando a resistência às deformações permanentes.

Embora o CAP 50/70 puro tenha apresentado desempenho inferior na temperatura avaliada, os resultados que mostram na Tabela 3 indicam viabilidade de aplicação para tráfego padrão em temperaturas de desempenho inferiores.

Tabela 3: Classificação do nível de tráfego dos ligantes asfálticos quanto ao valor do Jnr.

Amostra	Temperatura (°C)	Jnr a 3200 Pa (KPa ⁻¹)	Jnr range in classification	Criterion FWHA
CAP 50/70	64	4,10	Jnr > 4,0	-
AMP 55/75	64	2,00	Jnr < 4,0	Padrão
2% MMT	64	3,80	Jnr < 4,0	Padrão
3% MMT	64	3,80	Jnr < 4,0	Padrão
4% MMT	64	3,70	Jnr < 4,0	Padrão
5% MMT	64	3,20	Jnr < 4,0	Padrão
2% OMMT-WB	64	3,70	Jnr < 4,0	Padrão
3% OMMT-WB	64	3,70	Jnr < 4,0	Padrão
4% OMMT-WB	64	3,90	Jnr < 4,0	Padrão
5% OMMT-WB	64	5,50	Jnr > 4,0	-
2% OMMT-G	64	4,50	Jnr > 4,0	-
3% OMMT-G	64	4,50	Jnr > 4,0	-
4% OMMT-G	64	3,90	Jnr < 4,0	Padrão
5% OMMT-G	64	4,90	Jnr > 4,0	-

Fonte: Os autores (2026).

Em contrapartida, as composições modificadas com MMT e WB, bem como a amostra contendo 4% de Genamin, apresentaram conformidade para o *PG* de 64 °C, mostrando-se aptas para aplicação em misturas asfálticas destinadas a vias de tráfego padrão (com estimativa de 3 milhões de solicitações do eixo padrão).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados reológicos indicaram que a adição de montmorilonita e dos agentes modificadores não alterou significativamente o grau de desempenho (PG) dos ligantes, mantendo suas propriedades após o envelhecimento a curto prazo. Os ligantes modificados com MMT apresentaram melhor resistência ao envelhecimento, enquanto as amostras com WB mostraram comportamento semelhante ao CAP 50/70. Além disso, as pequenas variações no ângulo de fase indicaram preservação do comportamento viscoelástico dos ligantes.

As amostras modificadas apresentaram melhorias nas propriedades elásticas e valores de Jnr, dif inferiores a 10%, indicando que a incorporação dos modificadores não comprometeu o desempenho dos ligantes. Os ligantes modificados com MMT, WB e 4% de Genamin atenderam aos critérios de tráfego do FHWA para PG 64 °C, demonstrando potencial aplicação em pavimentos submetidos a tráfego padrão. De modo geral, a utilização de montmorilonita, especialmente com 5% de Genamin, promoveu melhorias nas propriedades reológicas e na resistência ao envelhecimento dos cimentos asfálticos.

REFERÊNCIAS

- AIREY, G. D. Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. **Fuel**, v. 82, n. 14, p. 1709-1719, 2003.
- CHEN, X. et al. Quantitative analysis of oxidative aging effects on the fatigue resistance of asphalt mixtures based on the simplified viscoelastic continuum damage (S-VECD) model. **International Journal of Fatigue**, v. 177, e107916, 2023.
- DE PAIVA, L. B.; MORALES, A. R.; DÍAZ, F. R. Valenzuela. Organoclays: properties, preparation and applications. **Applied clay science**, v. 42, n. 1-2, p. 8-24, 2008.
- PETERSEN, J. C. A review of the fundamentals of asphalt oxidation: chemical, physico-chemical, physical property, and durability relationships. **Transportation research circular**, n. E-C140, 2009.
- VARGAS, M. A. et al. Effects of montmorillonite (Mt) and two different organo-Mt additives on the performance of asphalt. **Applied Clay Science**, v. 139, p. 20-27, 2017.
- YADYKOVA, A. Y.; ILYIN, S. O. Bitumen improvement with bio-oil and natural or organo-modified montmorillonite: Structure, rheology, and adhesion of composite asphalt binders. **Construction and Building Materials**, v. 364, e129919, 2023.