CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO COM ÓLEO DE COPAÍBA

Emmanuely Regina Araújo Diniz[1], Diego José Araújo Viégas[2]; Loredanna Melyssa Costa de Souza[3]; Maria Eduarda Velez[4]; Valter Ferreira de Souza Neto[5]; Ana Maria Gonçalves Duarte[6]

[1]Graduando em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Brasil (emmanuely.regina@estudante.ufcg.edu.br)
[2] Doutorando em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco(UPE), Recife, Brasil
3 Doutora em Engenharia de Processos Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Brasil
[4]Graduanda em Engenharia Civil e Ambiental Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Brasil
[5] Doutor em Engenharia Civil e Ambiental Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Brasil
[6] Professora PhD da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Brasil

Resumo: O CAP com óleo de copaíba visa reduzir os defeitos no asfalto sustentavelmente. Com isso, objetivou-se avaliar o CAP 50/70 modificado com 1%, 2% e 3% do óleo de copaíba via RTFOT, MSCR e LAS. A adição de 3% reduziu a compliância não recuperável, resistindo ao tráfego pesado, e diminuiu a sensibilidade a deformações, embora tenha reduzido o PG para 58°C. Concluiu-se que o aditivo natural é uma alternativa promissora para pavimentação.

Palavras-chave: Ligante asfáltico; Óleo de copaíba; Sustentabilidade; Reologia avançada.

INTRODUÇÃO

A malha rodoviária exerce um papel fundamental na economia brasileira, sendo responsável por cerca de 65% da movimentação de mercadorias e de 95% do transporte de passageiros (CNT, 2024). Tendo isso em vista, evidencia-se a importância de estudos avançados em relação à pavimentação, uma vez que rodovias em más condições geram elevados custos operacionais, atrasos logísticos e aumento no consumo de combustível, conforme aponta a mais recente Pesquisa CNT de Rodovias.

Além do impacto econômico, projetos de pavimentação voltados à sustentabilidade auxiliam na redução de danos ambientais. Vias bem conservadas minimizam a emissão de carbono, pois permitem que os veículos trafeguem com maior eficiência e menor resistência ao rolamento (Wang; Harvey; Kendall, 2014). Portanto, alinhar a engenharia de pavimentos aos princípios da economia circular – que visam a redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais – não é apenas uma escolha técnica, mas uma exigência para o desenvolvimento nacional equilibrado (Ingrassia *et al.*, 2020).

Segundo Mendes *et al.* (2023), a economia circular ganhou destaque nas discussões técnicas e empresariais no Brasil a partir da publicação da Lei n°12.305/2010, que instituiu a política nacional de resíduos sólidos. Essa legislação tem como objetivo promover a gestão eficiente de resíduos aliada à adoção de tecnologias sustentáveis. Essa abordagem rompe com o modelo obsoleto da economia linear, no qual os materiais eram puramente descartados após o ciclo de vida primário, o que ocasionava um alto volume de resíduos desperdiçados, mesmo possuindo elevado potencial de reaproveitamento.

Impulsionada por essa mudança de paradigma, a indústria da construção rodoviária passou a buscar práticas sustentáveis visando minimizar os impactos ambientais e otimizar os custos associados a esse modal. Nesse cenário, os bio-ligantes derivados de óleo vegetais destacam-se pela capacidade de alterar positivamente o comportamento viscoelástico dos ligantes convencionais (Cui *et al.*, 2020). O óleo de copaíba enquadra-se nesse conceito como um modificador de matriz asfáltica rico em hidrocarbonetos, os quais favorecem a

compatibilidade e a interação com a matriz orgânica do asfalto (Ferreira *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2021).

Recentes investigações utilizando o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) demonstram que a incorporação desse óleo-resina não atua apenas como um agente rejuvenescedor e promotor de trabalhabilidade. Ela também confere propriedades antioxidantes ao ligante asfáltico, otimizando o seu módulo complexo em altas temperaturas e mitigando o envelhecimento a curto prazo durante o processo de usinagem (Melo Neto, 2025).

Diante do exposto, a presente pesquisa tem como principal objetivo analisar o comportamento reológico do cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70) modificado com a adição do óleo de copaíba nos teores de 1%, 2% e 3%.

MATERIAL E MÉTODOS

Os materiais utilizados na presente pesquisa foram:

- Ligante asfáltico, obtido pela distribuidora Stratura Asfaltos S/A, com classificação 50/70;
- Ligante asfáltico modificado, doado pela empresa JBR Engenharia, de classificação 55/75 SBS;
- Óleo de copaíba, nos teores de 1%, 2% e 3%.

Inicialmente foi feita a caracterização física do ligante asfáltico, por meio do ensaio de envelhecimento a curto prazo – RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*). Para a realização desse ensaio foi utilizado o equipamento da Figura 1.



Figura 1. Estufa do RTFOT

Esse equipamento provoca o envelhecimento do material por oxidação e evaporação, desse modo é possível estudar a presença de frações de óleo mais leves e a maneira que ele oxida. A análise das amostras de CAP puro, adicionado o óleo de copaíba em 1%, 2% e 3% foram feitas segundo as normas ASTM D 2872:2022 e NBR ABNT 15235:2018.

Posteriormente, para a determinação das propriedades reológicas desses ligantes asfálticos, foram realizados os ensaios de PG (*Performance Grade*), LAS (*Linear Amplitude Sweep*) e MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*).

O grau de desempenho dos ligantes asfálticos foram determinados ensaiando-os sob temperaturas relacionadas ao tempo de trabalho do material. Esse parâmetro foi definido por duas temperaturas, demarcando a faixa de uso do material, sendo a máxima para conservar uma ótima atuação - e pouca deformação permanente -, e a mínima para evitar o trincamento por baixa temperatura.

O ensaio de LAS – AASHTO TP101:2014, objetiva caracterizar o comportamento do ligante asfáltico por meio de esforços de fadiga. Ele pode ser dividido em duas partes: primeiramente, é realizado uma varredura de frequência 0,1-30Hz, a uma amplitude de 0,1% de deformação; na segunda etapa é feita outra varredura, dessa vez, a uma amplitude de 0,1-30% de deformação, sob uma frequência de 10Hz.

Por fim, o ensaio de MSCR, de acordo com a norma ASTM D7405:2020, é feito para avaliar o percentual de recuperação, a parcela não recuperável e a dependência dos ligantes asfálticos diante do nível de tensões múltiplas que o material será submetido.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o ensaio de reologia avançada, como o PG, utilizou-se o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), os resultados fornecidos por esse equipamento estão dispostos na Figura 2.

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.1	1.77	12.1	74.5	14.6	15.2	Pass
2	10.0	52.1	0.70	12.1	78.1	5.77	5.90	Pass
3	10.0	57.9	0.30	12.1	81.3	2.44	2.47	Pass
4	10.0	63.9	0.13	12.1	84.1	1.08	1.09	Pass
5	10.0	69.9	0.06	12.0	86.1	0.519	0.520	Fail

Figura 2. Resultados do ensaio de PG

A partir do ensaio de *Perfomance Grade* - PG obtêm-se os parâmetros de módulo complexo (G*), relacionado à rigidez do ligante, ângulo delta (δ), relacionado à elasticidade e o G*/sen(δ) relacionado a deformabilidade do ligante asfáltico, e os limites das faixas de temperatura. As análises foram feitas antes e após o RTFOT, os resultados referentes a esse processo estão presentes na Figura 3.

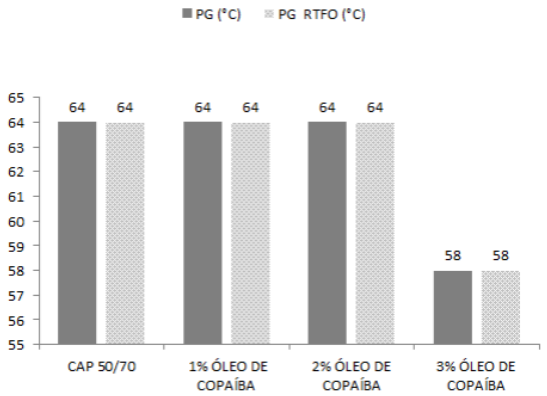


Figura 3. Temperaturas máximas de utilização

Com os dados obtidos, observou-se que os teores de 1% e 2% mantiveram o PG em 64°C, resistindo bem à oxidação, mantendo suas propriedades de deformabilidade e rigidez diante altas temperaturas, enquanto o teor de 3% reduziu o PG para 58°C. Essa redução é particularmente crítica ao planejar pavimentos para regiões de clima muito quente, como as rodovias que são expostas ao forte calor do nordeste.

Em relação ao módulo complexo (G*), as Figuras 4 e 5 apresentam os resultados encontrados.

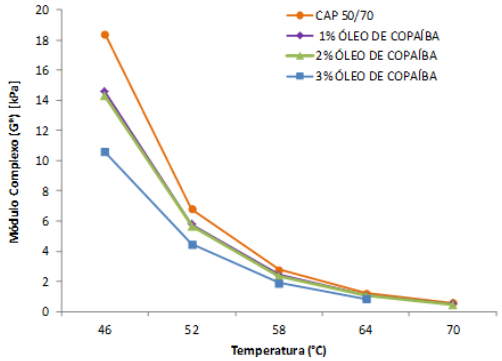


Figura 4. G* x °C antes do RTFOT

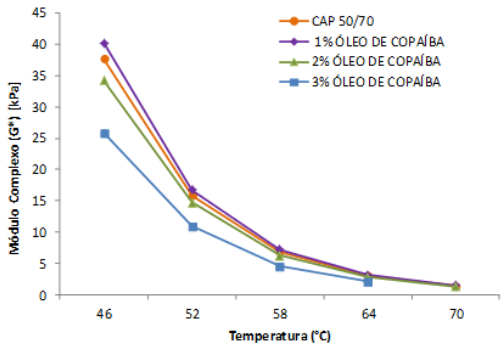


Figura 5. G* x °C após o RTFOT

Analisando os dados presentes na Figura 4, observa-se que o ligante puro, à 46°C, apresentou o maior valor de módulo complexo superior, reduzindo com o aumento da temperatura. Já na Figura 5, é visto uma aproximação de valores entre o ligante asfáltico puro e o modificado com 1% do óleo (38 e 40 kPa, respectivamente). Entretanto, o modificado apresenta valores de G* até 70°C, levando à conclusão de que o óleo de copaíba atribuiu propriedades antioxidantes ao ligante asfáltico, podendo utilizá-lo em altas temperaturas sem perder o seu desempenho.

Os dados referentes ao parâmetro G*/sen(δ), antes e após o RTFOT, foram ilustrados nas Figuras 6 e 7.

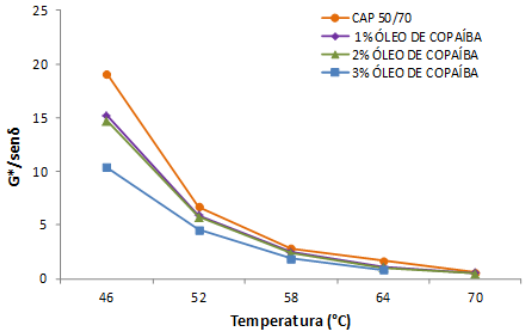


Figura 6. G*/sen(δ) x °C antes do RTFOT

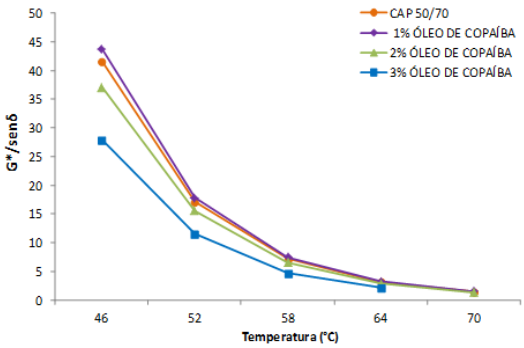


Figura 7. G*/sen(δ) x °C após RTFOT

De acordo com as especificações metodológicas vigentes, o parâmetro de resistência à deformação permanente, G*/sen(δ) deve apresentar valores mínimos de 1,0 kPa para o ligante original e de 2,2 kPa após o envelhecimento a curto prazo (RTFOT). Valores inferiores a esses limites indicam que o material não atende aos requisitos de desempenho em altas temperaturas. Ao avaliar as amostras modificadas, observa-se que, embora os teores de 1% e 2% de óleo de copaíba tenham alcançado o mesmo Grau de Desempenho (PG), a amostra com 2% apresentou uma redução de aproximadamente 13% no valor de G*/sen(δ) em relação à de 1%. Esse comportamento evidencia que o incremento na dosagem do óleo vegetal aumenta a deformabilidade do ligante, reduzindo sua rigidez e tornando-o mais suscetível ao acúmulo de deformações permanentes.

A Figura 8 abaixo apresenta os dados da avaliação dos parâmetros ‘A’ e ‘B’ na resistência ao dano, obtido pelo ensaio LAS, para as diferentes amostras do ligante asfáltico.

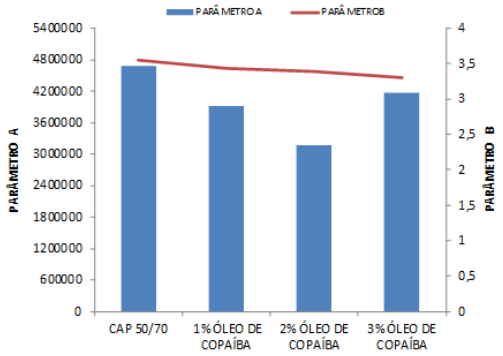


Figura 8. Dados dos parâmetros A e B

Após o estudo dos resultados observados na Figura 8 acima, verificou-se que o incremento do óleo não foi benéfico quanto ao aumento dos valores do parâmetro 'A', evidenciando que a modificação proposta não confere melhoria na integridade do ligante asfáltico diante do acúmulo de danos.

Segundo a norma DNIT 439/2022 e estudos como o de Nouali *et al.* (2024), o parâmetro A representa a propriedade viscoelástica do ligante não danificado e sua capacidade de manter a integridade estrutural sob fadiga, ou seja, maiores valores desse parâmetro, significam que a amostra resiste melhor ao início do dano. Sabendo disso, nota-se que o material modificado com 3% de óleo copaíba foi o que apresentou um valor para 'A' mais próximo do ligante asfáltico puro, o qual apresentou um parâmetro 'A' superior as amostras, da seguinte ordem: 16,5% maior que o modificado com 1%; 32,1% maior que o modificado com 2%; e 11% maior que o modificado com 3%.

O parâmetro 'B' indica a sensibilidade do ligante ao aumento do nível de deformações, significando que, quanto maior for o seu valor, mais susceptível o ligante será à variação da amplitude de deformações. Conforme os resultados obtidos, verificou-se uma redução dos valores do parâmetro 'B' à medida que aumentou os teores do óleo de copaíba, obtendo-se, para o teor de 3%, uma redução de aproximadamente 1% comparando-o ao ligante asfáltico puro.

Alta sensibilidade não é desejada para ligantes asfálticos, pois indica fácil susceptibilidade a deformações sob variações térmicas e de tensão (DNIT, 2022). Levando isso em consideração, a adição de 3% foi benéfica, do ponto de vista da durabilidade, por apresentar menor sensibilidade e variação mínima em relação ao ligante asfáltico puro.

Por meio do princípio do Dano Contínuo Viscoelástico (VECD), é possível quantificar a degradação estrutural do material isolando os efeitos puramente viscoelásticos. Conforme aponta o estudo de Nouali *et al.* (2024), o VECD permite criar um modelo de fadiga preditivo abrangente, fornecendo informações sobre o comportamento do ligante em temperaturas intermediárias para uma ampla faixa de deformações e ciclos de carregamento. A Figura 9 ilustra os resultados obtidos para a vida de fadiga (Nf) em função da amplitude de deformação para o material puro e os modificados.

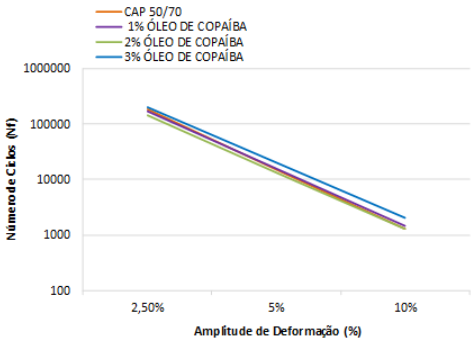


Figura 9. Estimativa de vida de fadiga do material

De acordo com os resultados obtidos, percebe-se que o Nf aumentou gradativamente conforme adicionou-se os teores do óleo de copaíba. É importante ressaltar que foram obtidos resultados similares para o ligante puro e com 1% de adição; no entanto, para o ligante com 3% de óleo de copaíba, observou-se a maior vida de fadiga geral, enquanto o teor de 2% apresentou resultados bem próximos aos do ligante asfáltico convencional.

De acordo com Ziari *et al.* (2020), níveis de deformação mais baixos (em torno de 2,5% a 3%) simulam adequadamente o comportamento de pavimentos robustos com baixos níveis deflectométricos e possuem comportamento semelhante a um pavimento rígido. Em contrapartida, altos níveis de deformação representam melhor pavimentos delgados e flexíveis, sujeitos a maiores flechas sob ação do tráfego.

A análise da resistência ao dano de ligantes asfálticos demonstra a existência de uma forte dependência entre a resistência à fadiga desses materiais e a amplitude de deformação (ZIARI *et al.*, 2020). Diante disso, o modelo VECD mostra-se como um importante modelo para prever, com maior exatidão, o desempenho das modificações propostas sob múltiplas solicitações de campo.

Quanto ao ensaio de MSCR, a Figura 10 contempla os resultados de Jnr para o CAP 50/70 nos teores de óleo de copaíba, previamente expostos, sob tensões de 0,1 kPa e 3,2 kPa.

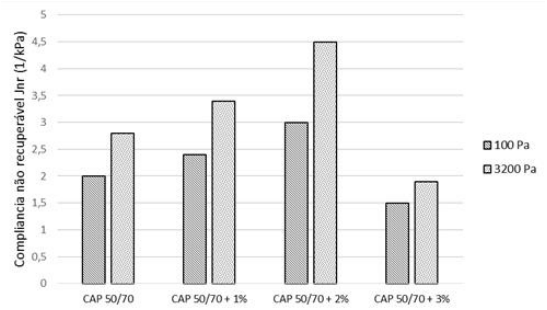


Figura 10. Compliances nãos recuperáveis para as amostras estudadas

Analisando o gráfico acima, vê-se maiores valores de compliância não recuperável para as amostras modificadas com 1% e 2%, quando comparadas à mistura de referência (CAP 50/70). Entretanto, para o teor de 3% o valor foi demasiadamente menor que o do ligante asfáltico puro, evidenciando uma menor susceptibilidade à deformação permanente.

Para avaliação do tráfego, adotou-se a classificação baseada na compliância não recuperável (Jnr) a 3,2 kPa, conforme a AASHTO M332 (2021). Verificou-se que o teor de 1% apresentou um Jnr inferior a 4,5 kPa^{-1}, enquadrando-se nos requisitos para tráfego padrão (S), assemelhando-se ao comportamento do ligante asfáltico puro. A amostra modificada com 2% apresentou um aumento no valor do Jnr (aproximadamente 4,2 kPa^{-1}), evidenciando uma maior suscetibilidade a deformações permanentes em relação aos demais teores. Ademais, esse material se manteve dentro do limite normativo, enquadrando-se nos requisitos mínimos para o tráfego padrão (S). Para o CAP 50/70 + 3% de óleo de copaíba foi obtido um Jnr entre 1 kPa^{-1} e 2 kPa^{-1}, indicando que este atende aos requisitos para tráfego pesado (H). Esse comportamento evidencia que o óleo de copaíba não atua apenas como um agente sustentável, mas como um modificador de desempenho eficaz contra a deformação permanente em cenários de alta solicitação.

Além disso, outro parâmetro obtido por meio do ensaio de MSCR é a porcentagem de recuperação elástica (R%) da amostra durante o tempo de 9 segundos após a aplicação de carga para os ciclos de tensão de 0,1 kPa e 3,2 kPa. A Figura 11 apresenta os resultados com o CAP 50/70 e as adições do óleo de copaíba.

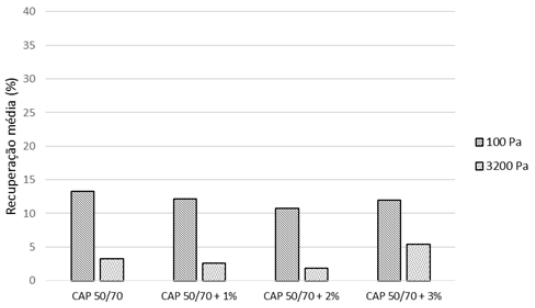


Figura 11. Resultados das recuperações elástica

Para um tráfego normal, tensão de 0,1 kPa, houve redução para todos os teores na recuperação elástica das amostras do ligante asfáltico modificado, quando comparando-os ao CAP 50/70 puro, indicando uma diminuição do comportamento elástico do ligante com a adição do óleo.

Já para um tráfego intenso, tensão de 3,2 kPa, ocorreu uma redução nos teores de 1% e 2%, enquanto que o teor de 3% apresentou um leve aumento, em torno de 2,1%. Embora esse incremento não seja expressivo, sugere uma melhor resposta elástica relativa sob tensões mais elevadas.

Apesar do teor de 3% não ter aumentado significativamente a recuperação elástica, o fato de ter diminuído o Jnr comparado ao ligante puro, indica menor suscetibilidade à deformação permanente, tornando o resultado positivo.

Os resultados obtidos, referente ao Jnr diff, para as diferentes amostras analisadas nessa pesquisa podem ser vistas na Figura 12.



Figura 12. Resultados do Jnr diff

Analisando a figura acima, vê-se que o parâmetro Jnr diff (utilizado para avaliar a sensibilidade do ligante à variação de tensão) apresentou valores inferiores ao limite estabelecido pela AASHTO M332 (2021) de 75%, em todas as amostras analisadas. Com isso, apesar dos teores de 1% e 2% terem obtido maior sensibilidade em relação ao ligante puro, seus resultados mantiveram-se dentro da faixa aceitável. Além disso, é essencial destacar que o teor de 3% apresentou uma redução no parâmetro Jnr diff, apontando um comportamento mais estável diante variações de carregamento

CONCLUSÃO

Com as análises antes e após o envelhecimento a curto prazo (ensaio RTFOT), observou-se que o ligante asfáltico puro e os modificados com 1% e 2% de óleo de copaíba mantiveram a mesma classificação PG, indicando que a adição nesses teores não promoveu alterações significativas na resistência à oxidação nem no desempenho em altas temperaturas.

Em relação ao módulo complexo (G*) antes do envelhecimento a curto prazo, verificou-se que o CAP 50/70 puro apresentou valores superiores aos dos ligantes asfáltico modificado, com redução progressiva à medida que a temperatura aumentou. Após o envelhecimento, o ligante asfáltico puro e o modificado com 1% apresentaram comportamentos semelhantes, com redução do módulo ao incremento de temperatura.

A análise do parâmetro G*/sen(δ) indicou que para os teores de 1% e 2% o PG foi o mesmo (64°C). Contudo, o ligante asfáltico adicionado 2% do óleo de copaíba apresentou uma redução de aproximadamente 13% nesse parâmetro em relação ao teor de 1%, indicando maior suscetibilidade à deformação em altas temperaturas.

Para o parâmetro ‘A’, verificou-se que a adição do óleo de copaíba não foi eficaz em promover melhorias na resistência ao acúmulo de danos, visto que não houve incremento significativo deste parâmetro para os teores analisados. Em contrapartida, o parâmetro ‘B’ indicou comportamento positivo, mostrando que a modificação reduziu a sensibilidade do ligante às variações térmicas.

Em relação à compliância não recuperável (Jnr), observou-se que os ligantes asfálticos com adições de 1% e 2% apresentaram valores superiores ao obtido para o CAP 50/70 puro, indicando maior suscetibilidade à deformação permanente. Por outro lado, o teor de 3% resultou em redução do Jnr em relação ao ligante asfáltico puro, evidenciando melhor desempenho quanto à resistência à deformação permanente e indicando maior potencial de aplicação sob condições de tráfego mais severas.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), especialmente ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), onde a pesquisa pôde ser desenvolvida.

Estende-se os agradecimentos à distribuidora Stratura Asfaltos S/A e a empresa JBR Engenharia, pela disponibilidade dos materiais essenciais para a realização do estudo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 332-21**: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. Washington, DC: AASHTO, 2021.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 101-14**: Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep. Washington, DC: AASHTO, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2872:1997**: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). West Conshohocken, PA: ASTM International, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7405-20**: Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. ABNT NBR 15235:2005**: Materiais asfálticos - Determinação da resistência à separação de fase. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de Rodovias 2024: Relatório Gerencial**. Brasília: CNT, 2024. Disponível em: https://pesquisarodovias.cnt.org.br/. Acesso em: 21 abr. 2026.

CUI, P. et al. Mechanisms and performance of bio-oil as a modifier for asphalt binder: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, 119265, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 439/2022-ES**: Pavimentação asfáltica - Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2022.

FERREIRA, M. S. et al. **Copaifera oil-resin: Chemistry, extraction and applications**. Industrial Crops and Products, v. 187, 115424, 2022.

INGRASSIA, L. P. et al. **The role of circular economy in the assessment of sustainable pavement management.** Journal of Cleaner Production, v. 269, 122355, 2020.

MELO NETO, O. M. **Abordagem multidimensional de misturas asfálticas com elevado teor de RAP rejuvenescidas com óleo de babaçu**. 2025. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos

Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2025.

MENDES, L. P. T.; BEZERRA, A. L. R.; SOUZA, M. C. R. de; RIBEIRO, L. da S.; GUEDES, L. R. **Economia circular como mecanismo de gestão ambiental: utilização de RAP em camadas de revestimento asfáltico**. Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 10, n. 24, p. 151-169, 2023.

NOUALI, Mohammed; DONY, Anne; CARTER, Alan. **Evaluation of fatigue life of asphalt binders using the time sweep and linear amplitude sweep tests: A literature review**. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) , v. 11, n. 6, p. 1210-1242, 2024.

SILVA, L. S. et al. Uso de óleos vegetais na modificação e rejuvenescimento de ligantes asfálticos: Uma revisão sistemática. **Revista Matéria (UFRJ)**, v. 26, n. 4, 2021.

WANG, T.; HARVEY, J.; KENDALL, A. **Influence of pavement network characteristics and use phase on lifecycle greenhouse gas emissions of pavement networks**. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 32, p. 126-140, 2014.

ZIARI, Hassan; AMINI, Amir; GOLI, Ahmad. **The effect of different aging conditions and strain levels on relationship between fatigue life of asphalt binders and mixtures**. Construction and Building Materials, v. 244, p. 118345, 2020.