







Efeitos da adição do óleo de canola nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas

Effects of canola oil addition on the mechanical properties of asphalt mixtures

Thamires Dantas Guerra¹, Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena¹,
Daniel Beserra Costa¹, Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça¹,
Osires de Medeiros Melo Neto¹, Alice Oliveira Justo¹

¹Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil

Contato: thamires_guerra@hotmail.com,  (TDG); lucenaafb@uol.com.br,  (AEFL); daniel.beserra@gmail.com,  (DBC); ana.duartemendonca@professor.ufcg.edu.br,  (AMGDM); osiresdemedeiros@gmail.com,  (OMMN); alicejusto27@gmail.com,  (AOJ)

Recebido:

1 de novembro de 2022

Aceito para publicação:

10 de setembro de 2023

Publicado:

17 de janeiro de 2024

Editor de Área:

Kamilla Vasconcelos,
Universidade de São Paulo, Brasil

Palavras-chave:

Trabalhabilidade.
Temperatura.
Bio-óleos.
Viscosidade.
Resistência à umidade.

Keywords:

Workability.
Temperature.
Bio-oils.
Viscosity.
Moisture resistance.

DOI: 10.58922/transportes.v31i3.2857



RESUMO

Nos últimos anos, diversas técnicas foram desenvolvidas com o intuito de reduzir as temperaturas de mistura e compactação das misturas asfálticas convencionais promovendo a redução das emissões de poluentes e do consumo energético, como o uso de aditivos químicos ou orgânicos. Assim, este estudo avaliou os efeitos da adição do óleo de canola no ligante asfáltico PG 64-XX e sua influência no desempenho mecânico de misturas asfálticas produzidas com esse ligante modificado nos teores de 1%, 2% e 3%. Realizou-se a caracterização mecânica por meio dos ensaios de resistência à tração, dano por umidade induzida, módulo de resiliência, módulo dinâmico, *flow number* e vida de fadiga. Dentre as principais conclusões, destaca-se uma diminuição máxima na temperatura de 5,2 °C para o teor de 3% de óleo de canola, mesmo que as misturas não pudessem ser classificadas como misturas asfálticas mornas. Entretanto, houve aumento da resistência à ação deletéria da água e economia de energia durante o aquecimento do ligante asfáltico e dos agregados no processo de produção.

ABSTRACT

In recent years, numerous techniques have emerged to lower the mixing and compaction temperatures of traditional asphalt mixtures, aiming to reduce pollutant emissions and energy consumption. One approach involves incorporating chemical or organic additives, such as canola oil, into the asphalt binder PG 64-XX. This study investigates the impact of adding canola oil at concentrations of 1%, 2%, and 3% on the mechanical properties of asphalt mixtures produced using the modified binder. Mechanical characterization encompassed various tests, including tensile strength, induced moisture damage, resilience modulus, dynamic modulus, flow number, and fatigue life. Notably, the results revealed a significant reduction in temperature, with a maximum decrease of 5.2 °C observed in mixtures containing 3% canola oil. Although these mixtures did not meet the classification criteria for warm asphalt mixtures, they exhibited enhanced resistance to water-related deterioration and resulted in energy savings during the heating process for both the asphalt binder and aggregates in production. These findings highlight the potential benefits of incorporating canola oil into asphalt mixtures, demonstrating its positive influence on temperature reduction, moisture resistance, and energy efficiency in the production process.

1. INTRODUÇÃO

Os ligantes asfálticos tradicionalmente utilizados na produção de misturas asfálticas a quente são oriundos do processo de refino do petróleo (Bernucci et al., 2022). O alto custo do ligante asfáltico e a busca por materiais alternativos junto a órgãos ambientais são algumas motivações para estudar a viabilidade de materiais sustentáveis como modificadores de ligante asfáltico (Al-Omari, Khedaywi e Khasawneh, 2018; Mendonça et al., 2022a).

Nos processos de mistura e compactação, na produção de misturas asfálticas, o ligante asfáltico é submetido a altas temperaturas e apresenta oxidação com parte de suas frações mais leves volatizadas, resultando no aumento da consistência (Gawel, Czechowski e Kosno, 2016; Uchoa et al., 2021; Bernucci et al., 2022; Mendonça et al., 2022b). A partir disso a indústria da pavimentação vem buscando novas soluções que atendam critérios ambientais e técnicos que possibilitem a produção dessas misturas em temperaturas mais amenas, reduzindo a oxidação, o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa (Ferrotti et al., 2017; Gao et al., 2020; Costa et al., 2023; Porto et al., 2023).

Modificadores redutores de viscosidade proporcionam diminuições na temperatura de mistura e compactação, mas deve ser investigado até que ponto essa redução não influencia de forma negativa no desempenho do ligante asfáltico frente às solicitações do tráfego (Melo Neto et al., 2022c). Uma alternativa é a utilização de gorduras saturadas com maior ponto de fusão, baixo custo e com facilidade de obtenção (Uchoa et al., 2021). Atualmente, produtos de origem vegetal foram propostos como modificadores redutores de viscosidade do ligante asfáltico para melhorar a trabalhabilidade e reduzir as temperaturas (Hu et al., 2020). Outra vantagem para o uso desses bio-óleos é a obtenção por fontes renováveis (Su et al., 2018).

A mistura asfáltica morna (MAM) é uma tecnologia que pode ser obtida por meio de modificadores como óleos naturais ou sintéticos, parafina e cera, possibilitando melhoria nas condições de trabalho do entorno da obra devido à redução de poluentes, além de atuar como antioxidante tornando o ligante asfáltico mais flexível e resistente a trincas por fadiga (Palacio e Maquillón, 2013; Silva, 2016; Moraes et al., 2022). No Brasil, os estudos e aplicações de bio-óleos se iniciaram junto aos institutos de pesquisas, onde são desenvolvidas, em sua maioria, com fins acadêmicos. Portanto, há a importância de intensificar as pesquisas na área de misturas mornas para se identificar quais seriam as técnicas ou produtos mais convenientes para o país (Silva et al., 2022).

Souza (2012) investigou a incorporação do óleo da Mamona para fabricação de misturas mornas com teores de óleo variando de 2% a 9% em peso. Os resultados obtidos apontaram reduções de 10 °C nas temperaturas de usinagem e compactação quando adicionou 5% do óleo da Mamona sem comprometimento das propriedades mecânicas. O autor comprovou um ganho na resistência à umidade após o uso de 3% e 5% de óleo de Mamona nas misturas asfálticas, apontando o potencial de adesividade do óleo. Wang et al. (2018) também analisaram a incorporação desse mesmo aditivo verde e observaram redução de resistência à deformação permanente e ganho de resistência à fadiga, corroborando com Portugal et al. (2017).

Silva et al. (2022) inseriram óleo de linhaça ao ligante asfáltico PG 64-XX com grau de penetração 50/70 nos teores de 1% a 6% e observaram reduções nas temperaturas de mistura e compactação de até 15 °C com 6% do óleo, mas se reduziu o nível de tráfego suportado e vida de fadiga. Entretanto, o teor de 4% do óleo de linhaça apresentou uma redução na temperatura de usinagem da ordem de 10 °C, além de que sua temperatura máxima de grau de desempenho, 58 °C, ter sido reduzido em apenas um degrau em comparação ao ligante sem óleo, sendo classificado como ideal para o tráfego padrão.

Melo Neto et al. (2022b) avaliaram o uso de ácido graxo da borra do óleo de soja como modificador redutor de viscosidade do ligante asfáltico classificado com penetração 50/70. Os autores obtiveram redução de 7 °C e 6 °C para as temperaturas de mistura e compactação, respectivamente, ao adicionar 3% do modificador por peso do ligante. Ao utilizar 5% do ácido graxo a diminuição foi de 12 °C para a temperatura de mistura, onde esse teor proporcionou redução da temperatura de performance grade (PG) de 64 °C para 58 °C. Contudo, esses teores não viabilizaram o uso do ligante em misturas asfálticas convencionais devido à baixa resistência à deformação permanente com o aumento da fluidez do ligante. Melo Neto et al. (2022a) aplicaram esses ligantes modificados em misturas asfálticas recicladas com 40% de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) e comprovaram o poder de reciclagem do modificador para misturas envelhecidas, obtendo comportamento de misturas asfálticas recicladas superior ao da mistura asfáltica convencional (não envelhecida). As misturas asfálticas recicladas com o ácido graxo apresentaram maior resistência à umidade quando comparadas às misturas convencional e reciclada sem o ácido graxo, conferindo a boa adesão que o modificador proporcionou à mistura.

O uso de óleos vegetais em ligantes asfálticos tem se mostrado válido para redução da viscosidade e como melhorador de adesividade em misturas asfálticas, apontando ganho de resistência aos efeitos deletérios da água (Souza, 2012; Melo Neto et al., 2022a). Dentre os óleos vegetais, tem-se o óleo de Canola (*Brassica napus L. var. oleifera*) originado a partir do cultivo da Canola, chamada também de Colza, com grande potencial de ser um aditivo natural devido as suas propriedades, além de ser um produto renovável e biodegradável. A canola é utilizada na alimentação animal como forragem verde, é matéria-prima para extração de óleo que tem sido consumida na alimentação humana, além de ser usado na adubação, na produção de sabões e, mais recentemente, para produção de biocombustível (Mori, Tomm e Ferreira, 2014).

Segundo dados do BiodieselBR (Rodrigues, 2016) a produção mundial de óleos em milhões de toneladas no ano de 2016 foi de 66,56 para o óleo de palma, 51,99 para o óleo de soja, 27,63 para o óleo de canola e 16,42 para demais óleos (óleos de coco, algodão, oliva e amendoim). Cerca de 70% dos grãos de canola produzidos no Brasil, são oriundos do Rio Grande do Sul, possuindo em torno de 24% a 27% de proteína e 34% a 40% de óleo, constituindo uma das melhores alternativas para diversificação de culturas de inverno e geração de renda pela produção de grãos no Sul do Brasil.

A literatura apresenta estudos abordando ligantes asfálticos modificados com diferentes bio-óleos e óleos residuais, mas há lacunas na investigação do óleo de canola como modificador redutor de viscosidade do ligante asfáltico e sua influência no desempenho de misturas asfálticas. Dentro dessa perspectiva, este estudo avaliou os efeitos da adição do óleo de canola nos teores de 1%, 2% e 3% no desempenho mecânico de misturas asfálticas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Agregados naturais

Esta pesquisa utilizou agregados graníticos graduados de 19 mm e 9,5 mm, areia, pó de pedra e cal hidratada como fíler para a mistura asfáltica. A amostra de areia foi separada por amostragem de uma pequena pilha de estoque e, em seguida as amostras foram separadas por quarteamento. A Tabela 1 apresenta a caracterização física dos agregados e a Figura 1 as distribuições granulométricas desses materiais.

Tabela 1: Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados naturais

Ensaio	Norma	Especificação	Resultados			
			Brita 19 mm	Brita 9,5 mm	Pó de pedra	Areia
Massa específica real (g/cm ³)	ASTM C127 (ASTM, 2015a)	-	2,72	2,75	2,43	2,52
Massa específica aparente (g/cm ³)	ASTM C127 (ASTM, 2015a)	-	2,67	2,68	2,42	2,47
Absorção (%)	ASTM C127 (ASTM, 2015a)	≤2	0,28	0,51	0,74	0,16
Índice de Forma	ASTM D4791 (ASTM, 2010)	≥0,5	0,89	0,70	-	-
Equivalente Areia (%)	ASTM D2419 (ASTM, 2014b)	≥55	-	-	56,00	82,06
Abrasão "Los Angeles" (%)	ASTM C131 (ASTM, 2014a)	≤55	22,30	25,40	-	-

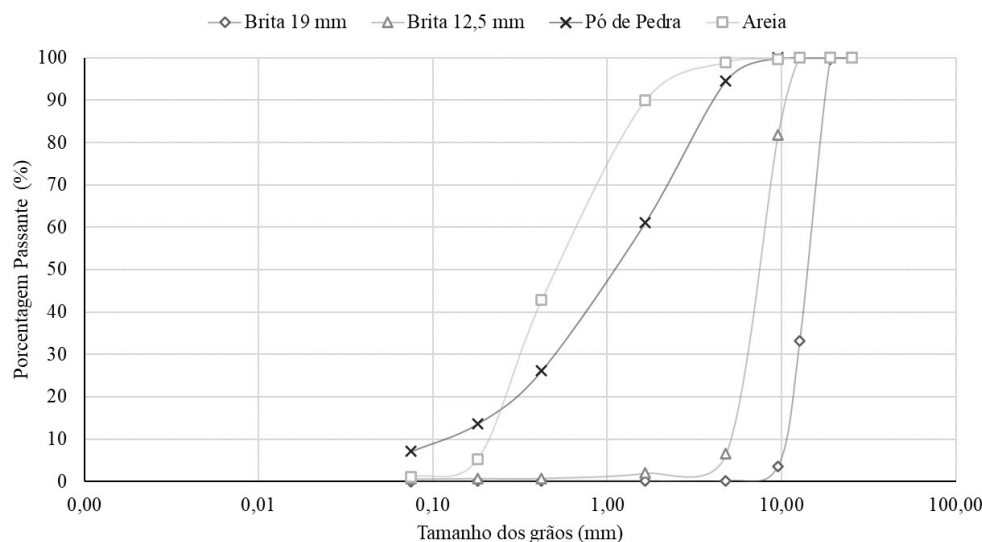


Figura 1. Curvas de distribuição granulométrica dos grãos naturais.

2.2. Óleo de canola

O agente modificador utilizado nessa pesquisa foi o óleo de canola. O óleo de canola foi obtido no comércio local da cidade de Campina Grande, Brasil. A indústria fabricante disponibilizou a caracterização físico-química do óleo, realizada por meio da *American Oil Chemists' Society* (AOCS). A Tabela 2 apresenta os dados da caracterização do óleo de canola. Todos os valores obtidos se apresentaram dentro dos intervalos especificados.

Tabela 2: Caracterização física e química do óleo de canola

Índice	Unidade	Valor	Valor de referência
Peso específico (20°C)	g/cm ³	0,916	0,914-0,920
Iodo	gI ₂ /100 g	114	110-126
Saponificação	mg KOH g ⁻¹	185	182-193
Matéria Insaponificável	%	0,88	≤2,0
Acidez, óleo refinado	% (ácido oleico)	0,15	< 0,3
Índice de Peróxido	mEq/kg	6,81	<10,0

2.3. Caracterização dos ligantes asfálticos

O ligante asfáltico PG 64-XX foi utilizado para compor as misturas asfálticas. A escolha deste tipo de ligante foi estabelecida pelo fato deste possuir corriqueira utilização na Região Nordeste do Brasil. Para a realização do estudo, foram utilizados teores de 1%, 2% e 3% do óleo de canola como modificador do ligante asfáltico PG 64-XX. Os teores estabelecidos para adição ao ligante foram baseados no estudo de Mendonça et al. (2022c) e Silva et al. (2022). No processo de mistura (ligante-modificador), o ligante asfáltico foi pré-aquecido em estufa a 130 °C para garantir a fluidez necessária para permitir a homogeneização. Em seguida, o aditivo foi inserido, separadamente, na proporção por peso do ligante puro, e as rotações foram elevadas para 600 rpm, mantendo as amostras por 30 minutos para homogeneização.

Após a obtenção dos ligantes asfálticos modificados, realizou-se a caracterização física empírica, reológica e química dos ligantes antes e após o envelhecimento *Rolling Thin Film Oven* (RTFO) ASTM D2872 (ASTM, 2019), utilizando os testes de penetração ASTM D5M (ASTM, 2020b), ponto de amolecimento ASTM D36M-14 (ASTM, 2020a) e viscosidade rotacional ASTM D4402 (ASTM, 2015b). Além disso, o teste de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) ASTM D 7653 (ASTM, 2018) foi realizado para caracterizar as amostras, identificando os grupos quimicamente funcionais. O teste FTIR permitiu o cálculo da concentração dos grupos funcionais (carbonila (C=O) e hidróxidos (O-H)), baseado na analogia das áreas de absorção características. O modo de ensaio foi transmitância onde as amostras de ligante asfáltico foram introduzidas entre duas placas de um material transparente ao infravermelho (KBr). O espectrômetro de infravermelho mediu as frequências absorvidas por pelo composto. Utilizou-se dois feixes de luz, um para irradiar a mostra e outro de referência. O monocromador faz com que só entre uma frequência de luz por vez no detector, de forma que o equipamento faz uma varredura, sendo que as frequências são registradas (como número de onda $1/\lambda$) no eixo x e no eixo y a diferença das intensidades da radiação transmitida e o feixe de referência.

Os índices de oxidação dos ligantes são geralmente obtidos por meio do cálculo das áreas dos picos envolvendo carbonilas, sulfóxidos e/ou hidróxidos (O-H). As regiões de picos avaliadas nesta pesquisa foram em torno de 1700 cm⁻¹ correspondendo ao pico C=O (carbonila) e entre 3200 cm⁻¹ e 3600 cm⁻¹ (hidróxido). Assim, os índices de carbonila e hidróxidos antes e após o RTFO foram calculados pelas Equações 1 e 2 respectivamente.

$$CO (\%) = 100 \times I_{CO} = 100 \times \frac{(\text{Área em torno de } 1700\text{cm}^{-1})}{(\text{Área do espectro})} \quad (1)$$

$$H (\%) = 100 X I_{OH} = 100 X \frac{(\text{Área entre } 3200 \text{ e } 3600 \text{ cm}^{-1})}{(\text{Área do espectro})} \quad (2)$$

Estas análises foram realizadas em 16 varreduras de espectro com resolução de 4 cm⁻¹. O equipamento utilizado foi um espectrômetro BRUKER, modelo FT-IR VERTEX 70.

2.4. Dosagem da mistura asfáltica

A dosagem da mistura asfáltica foi realizada seguindo a metodologia SUPERPAVE com N de projeto igual a 100 giros para obtenção de um índice de vazios de 4%, normatizada pela ASTM D6925 (ASTM, 2015c). Entre as três composições granulométricas distintas (superior, intermediária e inferior), a escolha das proporções dos agregados foi feita de forma a adequar a granulometria das misturas aos requisitos da metodologia SUPERPAVE e enquadrá-las aos limites estabelecidos para faixa C do DNIT 031 (DNIT, 2006) – ES. Dentre as curvas de distribuição dos tamanhos dos grãos, a curva que melhor se enquadrou foi a superior. A Tabela 3 apresenta o percentual dos materiais utilizados na composição da mistura asfáltica de referência e o teor de ligante de projeto para a mistura.

Tabela 3: Percentual dos materiais e parâmetros da dosagem da mistura asfáltica de referência

	Brita 19,0 mm	Brita 9,5 mm	Pó de pedra	Areia	Fíler	Ligante asfáltico	Volume de vazios	Vazios do agregado mineral	Relação Ligante/Vazios
(%)	14,24	24,67	41,76	11,86	2,37	5,10	4,06	15,29	73,82

2.5. Ensaio mecânicos das misturas asfálticas

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) de misturas asfálticas foi determinado seguindo o método de ensaio DNIT 136 (DNIT, 2018b). Primeiramente, a carga estática crescente foi aplicada usando uma prensa mecânica na velocidade de deformação de 0,8 ± 0,1 mm/s. Em seguida, a carga de ruptura foi lida empregando-se um anel dinamométrico acoplado à prensa. Uma média de 15 corpos de prova de cada tipo de mistura asfáltica foi testada para determinar a média dos resultados.

Para determinar a resistência à suscetibilidade à água, o teste de Lottman modificado (DNIT 180 – DNIT, 2018c) tem sido amplamente utilizado por muitos pesquisadores. O cálculo do dano por umidade induzido é chamado de Relação de Resistência à Tração (RRT) (%) e é dado pela razão entre a resistência à tração condicionada e a resistência à tração não condicionada, sendo o valor uma média dos três corpos de prova testados, condicionados e não condicionados.

O teste de Módulo de Resiliência – MR (DNIT 135 – DNIT, 2018a) foi realizado na prensa hidráulica IPC UTM-25. As amostras cilíndricas possuem aproximadamente 10 cm de diâmetro por 6,5 cm de altura. Foi aplicada uma carga de compressão igual a 10% da resistência à tração. Aplicou-se a frequência de 60 ciclos por minuto (1 Hz) com tempo de aplicação de 0,1 s e 0,9 segundos de repouso ou descarga. O MR foi submetido a variações de temperatura: 4 °C, 21 °C, 25 °C e 37 °C. Essas temperaturas foram escolhidas para obter um parâmetro para avaliação com o teste de Módulo Dinâmico.

O Módulo Dinâmico - |E*| (DNIT 416 - DNIT, 2019) foi avaliado aplicando-se uma tensão axial de compressão do tipo senoidal a uma amostra de 10 cm de diâmetro por 15 cm de

altura, em temperaturas e frequências de carga especificadas pela norma. Os testes foram realizados nas temperaturas de 4, 20 e 40 °C, com frequências de 25; 10; 5; 1; 0,5 e 0,1 Hz em cada temperatura para obtenção das curvas mestras.

No ensaio *Flow number* - Resistência à Deformação Permanente (DNIT 184 – DNIT, 2018e), a mistura asfáltica foi submetida a carregamento cíclico de compressão uniaxial, em um pulso haversine de 0,1 s com carregamento máximo de 1,6 kN, seguido de um descanso de 0,9 s, onde atua a carga de contato de 80 kN. O teste foi realizado no AMPT (Asphalt Mixture Performance Test) a uma temperatura de 60°C e ciclos de carga uniaxial compressivo de 200 kPa. As amostras tinham 10 cm de diâmetro por 15 cm de altura com índice de vazios de 7% ± 0,5%.

A Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada (DNIT 183 – DNIT, 2018d) foi realizada utilizando uma carga compressiva igual a 30%, 35%, 40% e 45% da resistência à tração. A frequência de pulso utilizada foi de 1 Hz (com 0,1 s de aplicação de carga senoidal e 0,9 s de repouso), com temperatura de 25 °C.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização física, reológica e química do ligante asfáltico

A Tabela 4 apresenta os resultados físicos empíricos dos ligantes asfálticos puro e modificados.

Tabela 4: Resultados físicos empíricos dos ligantes asfálticos puro e modificados

Ensaio antes RTFO						
Resultados						
	0%	1%OC	2%OC	3%OC	Limites	Norma
Penetração 0,1 mm (100 g, 5 s a 25 °C)	61	77	83	114	50 a 70	ASTM D5M (ASTM, 2020b)
Ponto de amolecimento (°C)	45	44	42,8	42,3	-	ASTM D36M -14 (ASTM, 2020a)
Ensaio após RTFO						
Varição de massa do ligante (%)	0,03	0,05	0,06	0,07	≤ 0,5	ASTM D2872 (ASTM, 2019)
Penetração 0,1 mm (100 g, 5 s a 25 °C)	45	43	54	65	-	ASTM D5M (ASTM, 2020b)
Ponto de amolecimento (°C)	52,3	52	48,3	48,3	-	ASTM D36M -14 (ASTM, 2020a)
Aumento do ponto de amolecimento (°C)	7,3	8	5,5	6	≤ 8	ASTM D36M -14 (ASTM, 2020a)
Penetração retida (%)	72,5	56,1	65,1	56,7	≥ 55	ASTM D5M (ASTM, 2020b)

Observa-se que o ligante asfáltico modificado por óleo de canola apresentou aumento nos valores de penetração e redução no ponto de amolecimento, antes e após RTFO, em todos os teores testados quando comparado ao ligante puro (AB). Esses comportamentos também foram observados na pesquisa de Melo Neto et al. (2022c), Mendonça et al. (2022c) e Silva et al. (2022) em que o ligante asfáltico foi modificado por óleo de copaíba, óleo de caroço de algodão e óleo de linhaça, respectivamente. Nota-se também que, à medida que aumenta o teor de óleo de canola no ligante, a penetração apresenta um ganho mais significativo, indicando que o modificador confere menor consistência ao ligante. A penetração retida é a razão entre a penetração do ligante envelhecido (após RTFO) e o ligante antes do envelhecimento. Observa-se que dentre todas as amostras testadas, a de menor penetração retida é a de 1%OC, ligante asfáltico modificado com 1% de óleo de canola, com valor de 56,1%, seguida da amostra com 3%OC com valor de 56,7%, mostrando que esses foram os ligantes mais sensíveis aos efeitos do envelhecimento.

Pontos de amolecimento mais baixos são, de certa forma, atrativos, visto que esse óleo pode ser utilizado em misturas asfálticas recicladas, confirmando a redução da consistência em temperaturas mais baixas. Comparando os resultados dos ligantes entre si, observa-se que o modificador em todos os teores testados apresentou redução no ponto de amolecimento, corroborando os resultados (Portugal et al., 2018; Wang et al., 2018; Melo Neto et al., 2022c; Silva et al., 2022) que já era um resultado esperado. Além disso, os valores obtidos indicam uma tendência de diminuição do ponto de amolecimento para AB quando se aumenta a quantidade de óleo adicionado, tanto nos resultados antes quanto após o RTFO. A Figura 2 apresenta os dados de viscosidade rotacional para as amostras analisadas nessa pesquisa.

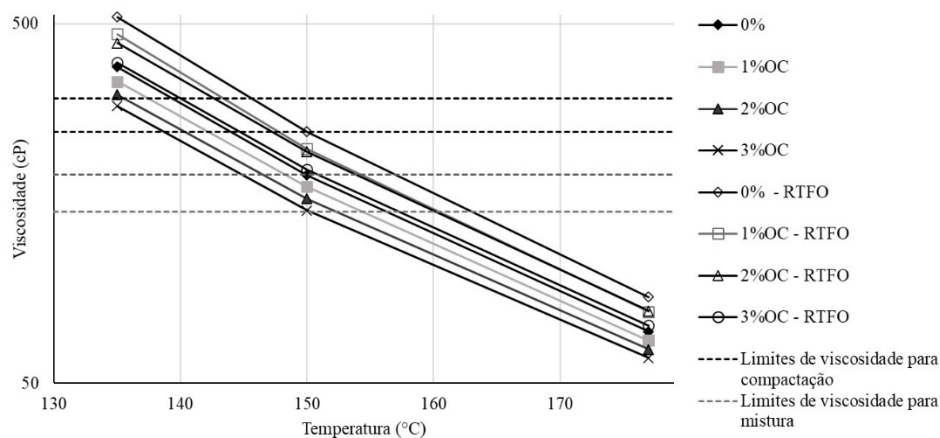


Figura 2. Viscosidade rotacional das amostras de ligante asfáltico.

De acordo com os resultados da Figura 2, observa-se que houve uma diminuição da viscosidade do ligante com o acréscimo dos teores do óleo de canola, principalmente nas temperaturas mais baixas do ensaio. Após o envelhecimento, observa-se um aumento da viscosidade em relação às amostras não envelhecidas (ligantes asfálticos modificados e não modificado). As amostras de ligante asfáltico com 2% e 3% de óleo de canola apresentaram menor viscosidade antes e após o RTFO, dentre todas as amostras testadas. As amostras apresentaram valores de viscosidade dentro das especificações da norma ASTM D4402 (ASTM, 2015b), em que as viscosidades antes do RTFO a 135 °C devem ser ≥ 274 , a 150 °C ≥ 112 e a 177 °C entre 57 e 285.

Os resultados apontam que o acréscimo do óleo de canola influencia na redução da viscosidade do ligante e, portanto, na diminuição das temperaturas de mistura e compactação das misturas asfálticas estudadas. A temperatura ideal do ligante asfáltico para a fabricação da mistura asfáltica deve se situar em $0,17 \pm 0,02$ Pa.s quando medida com o viscosímetro rotacional. A Tabela 5 apresenta as temperaturas de mistura e compactação encontradas por meio de interpolação, para a adição dos modificadores.

Tabela 5: Temperaturas de mistura e compactação

Amostras	Temperatura de		Temperatura	
	Compactação (°C)	Redução (°C)	de Mistura (°C)	Redução (°C)
0%	141,5	-	153,0	-
1%OC	139,8	1,7 (1,20%)	151,0	2,0 (1,31%)
2%OC	138,3	3,2 (2,26%)	149,3	3,7 (2,42%)
3%OC	137,0	4,5 (3,18%)	147,8	5,2 (3,40%)

A menor viscosidade assim como a menor temperatura de mistura foi encontrada no teor de 3% quando comparado ao ligante puro, reduzindo 5,2 °C (3,40%). Apesar da diminuição da temperatura não ser significativa, ainda assim permite uma redução de energia durante o processo de mistura da mistura asfáltica, em todas as amostras de ligante asfáltico modificado pelo óleo. Melo Neto et al. (2022c) obtiveram valor semelhante ao obtido com o uso de 3% de óleo de canola para temperatura de mistura ao utilizar 4% de óleo de algodão refinado no ligante asfáltico (148 °C). Mendonça et al. (2022c) obtiveram reduções nos valores de temperatura de mistura para o ligante asfáltico com óleo de algodão refinado nos teores de 1%, 2% e 3% em relação ao CAP 50/70 de 2 °C, 4,0 °C e 6 °C, respectivamente. Carvalho et al. (2022) apresentaram reduções nas temperaturas de mistura e compactação para o ligante asfáltico modificado com óleo de girassol nos teores de 1%, 2% e 3% de 1,0 °C e 3,3 °C; 6,0 °C e 1 °C e 4,0 °C; 6,0 °C, respectivamente. Silva et al. (2022) demonstraram o potencial do óleo de linhaça como redutor de viscosidade do ligante asfáltico, com a diminuição das temperaturas de mistura e compactação com o uso de 1%, 2% e 3% de 1,95 °C e 4,50 °C; 7,15 °C e 0,75 °C; 3,35 °C e 4,00 °C, respectivamente. Assim, observa-se que o óleo de canola apresentou comportamento semelhante aos óleos de copaíba, algodão refinado, girassol e o de linhaça na redução de temperaturas de mistura e compactação em relação. A Figura 3(a) apresenta os espectros referentes aos resultados do FTIR para o ligante puro (0%) e modificado com óleo de canola (1%, 2% e 3%), enquanto a Figura 3(b) mostra o espectro com faixa reduzida.

Os espectros de FTIR dos ligantes 0%, 1%, 2% e 3% antes do envelhecimento a curto prazo (RTFO) apresentaram as seguintes bandas características à hidrocarbonetos: picos em 2920 e 2851 cm^{-1} indicando vibrações de estiramentos axiais de grupos CH_2 , CH_3 (alifático), vibrações de C-H em 1456 cm^{-1} e 1375 cm^{-1} , relacionados a deformações angulares para CH_2 e CH_3 , respectivamente, bem como em torno de 718 cm^{-1} indicando a rotação de CH_2 de longas cadeias alifáticas. Os picos presentes na faixa entre 1740 e 1760 cm^{-1} , referentes ao estiramento da ligação C=O são indicativos de grupos carboxílicos presentes nas moléculas contidas no óleo de canola, como os ésteres (triacilgliceróis). Nos espectros também podem ser encontrados outros picos na faixa entre 1720 e 1680 cm^{-1} , também relacionados a grupos carboxílicos, porém para grupos funcionais como cetonas, aldeídos, ácidos carboxílicos e ésteres, relacionados à eventos de oxidação das ligações insaturadas e/ou alifáticas nas moléculas constituintes dos ligantes. Neste ponto, há presença em baixa intensidade de banda entre 3200 e 3600 cm^{-1} , para hidroxila (OH). Os picos entre 1030 e 1200 cm^{-1} são ligados a dois tipos de ligação: C-O e S=O (sulfóxidos), e também podem ser correlacionadas à eventos oxidativos. Ao avaliar os espectros na Figura 3(b), pode-se observar que a presença de um pico em 1760 cm^{-1} nas amostras está diretamente ligada ao óleo adicionado, e proporcional às quantidades adicionadas.

Para avaliar o envelhecimento do ligante, Carvalho (2022) considerou a diferença das áreas dos gráficos antes e após o RTFO. Uma amostra envelhece mais que a outra quando a área compreendida entre as linhas dos espectros após o envelhecimento é maior que as obtidas antes do envelhecimento representando uma maior oxidação. Assim, é possível quantificar a intensidade do envelhecimento de uma amostra em relação a outra. A Tabela 6 apresenta a as áreas de carbonilas e hidroxilas calculadas conforme descreve o item 2.3. Não foram aplicadas as áreas para a região de sulfóxidos e ligações C-O, pois é uma faixa que abriga também as ligações C-O do óleo de canola.

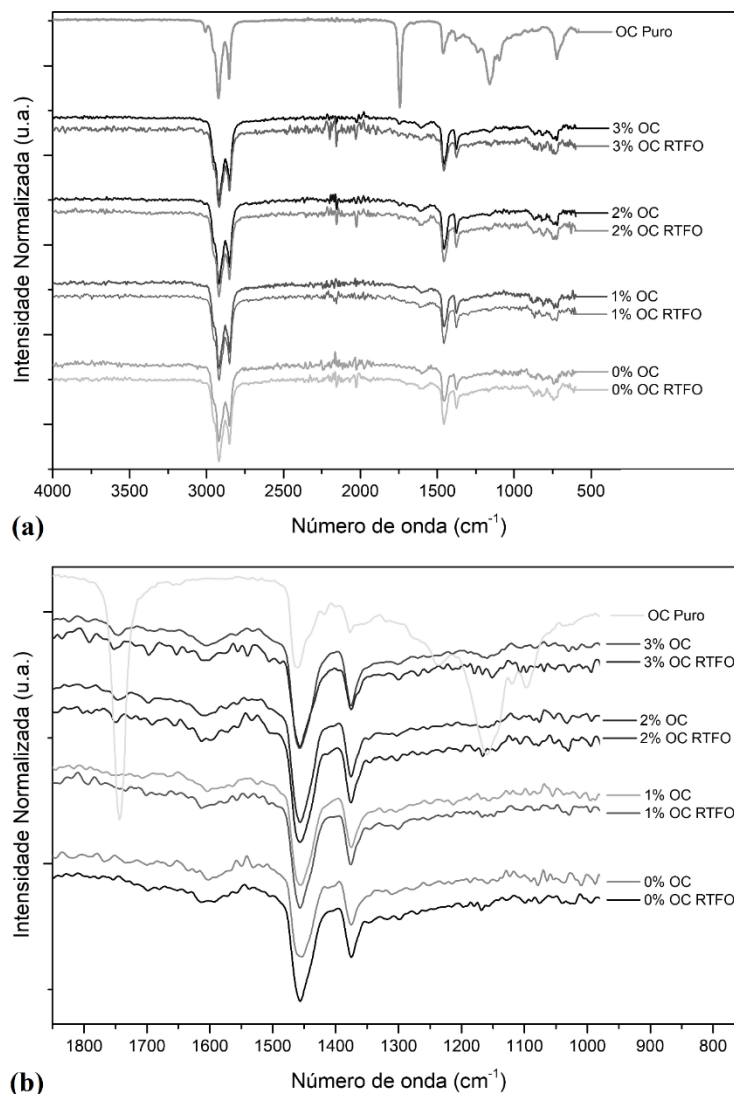


Figura 3. a) Espectros de FTIR antes e pós RTFO b) ampliação da imagem na faixa de 1000 a 1850 cm^{-1} .

Tabela 6: Oxidação das amostras de ligantes asfálticos puro e modificados

Amostra	Área de oxidação					
	Grupo Funcional					
	Carbonila		Hidroxila		Oxidação Total (CO+OH)(%)	
Antes RTFO	Após RTFO	Antes RTFO	Após RTFO	Antes RTFO	Após RTFO	
0%	0,81%	1,10%	3,56%	5,91%	4,37%	7,01%
1%OC	0,87%	1,00%	4,15%	4,73%	5,02%	5,73%
2%OC	0,95%	0,91%	3,90%	4,41%	4,85%	5,32%
3%OC	0,86%	0,92%	3,81%	4,15%	4,67%	5,07%

O percentual oxidado do ligante é obtido pela soma das áreas de oxidação (carbonilas+hidroxilas), e comparando-se as amostras antes e após o RTFO. Esta soma das porcentagens disponibilizam uma estimativa de oxidação total. Conforme exposto na Tabela 6 é possível observar que o a amostra 3%OC foi a que apresentou o menor percentual de oxidação pós RTFO seguido das amostras de 2%OC e 1%OC, indicando que o óleo de canola atuou como um agente antioxidante em comparação à amostra sem adição de óleo.

3.2. Avaliação mecânica das misturas asfálticas

A Figura 4 apresenta os valores médios da resistência à tração por compressão diametral (RT) dos 4 grupos de misturas asfálticas analisados.

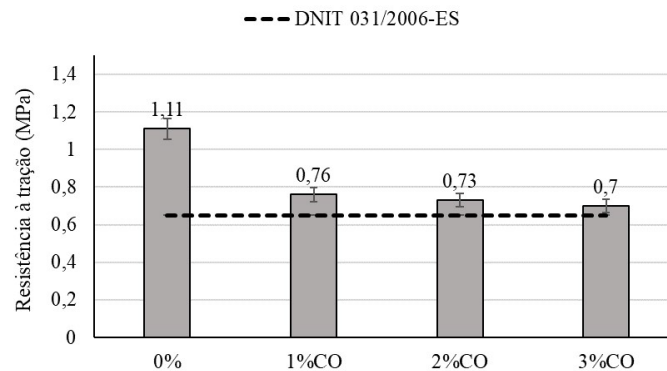


Figura 4. Resultados do ensaio de tração por compressão diametral (RT).

A partir dos dados apresentados na Figura 4, percebe-se que a resistência à tração diminuiu com o acréscimo do teor de óleo de canola no ligante, mas todos os resultados obtidos se encontram dentro das especificações da norma DNIT 031 (DNIT, 2006) – ES. Dessa forma, todas as misturas atingiram resistência à tração acima da exigida pela especificação, validando o teor de projeto selecionado e a contribuição da adição do óleo com a diminuição do valor de RT. A queda já era esperada em virtude da redução da consistência do material devido a incorporação do óleo de canola, por serem produzidos e compactados em temperaturas menores. Trabalhos recentes mostraram que todas as misturas mornas estudadas com algum aditivo, os valores de RT foram menores em relação à mistura de referência (Barros, 2017; Carvalho, 2018). Nesta pesquisa, ao comparar a mistura com ligante asfáltico puro (0%) e óleo de canola, observa-se uma redução de 31,5% na amostra 1%, 33,9% na amostra 2% e de 36,9% na amostra 3%.

A Figura 5 apresenta os valores médios da resistência retida à tração (RRT) das misturas asfálticas avaliadas. Para a metodologia SUPERPAVE, o valor de RRT mínimo para que a suscetibilidade à umidade da mistura asfáltica seja considerável aceitável é 80%. Entretanto, a norma AASHTO T 283 (AASHTO, 2014) e a norma DNIT 031 (DNIT, 2006) adotam 70% como valor mínimo de RRT para misturas asfálticas.

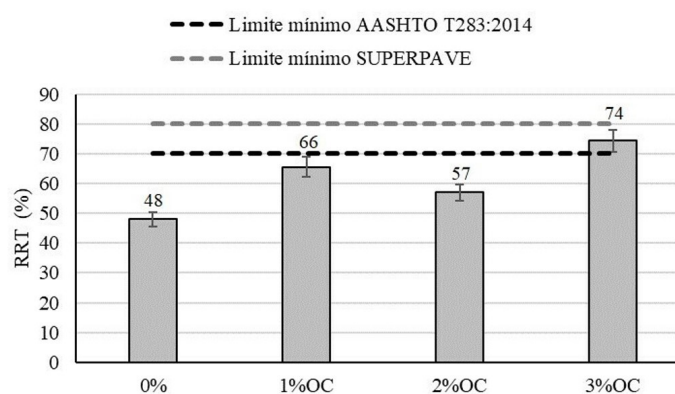


Figura 5. Resultados de resistência retida à tração (RRT).

Analisando a Figura 5, pode-se afirmar que a adição do óleo de canola atuou de forma benéfica nas misturas asfálticas, devido ao aumento do valor de RRT em relação à mistura com o ligante asfáltico puro (0%), o que poderia representar uma melhora no comportamento destas misturas em campo nas regiões de alta pluviosidade. O aumento foi de 37,19 e 55% após a adição do óleo de canola nos teores de 1%, 2% e 3%, respectivamente. Mesmo não atendendo aos parâmetros mínimos estabelecidos por normas, exceto para a mistura com 3% de óleo de canola, conclui-se que a adição do óleo no ligante contribuiu com o aumento da resistência da mistura asfáltica à ação deletéria da água.

Algumas pesquisas (Barros, 2017; Cavalcante, 2016; Moraes, 2018; Sales, 2015) também obtiveram um aumento no valor do RRT com a utilização de alguns aditivos de misturas mornas, indicando a possibilidade destes aditivos serem utilizados como agentes melhoradores da resistência à ação da água nas misturas asfálticas, onde apresentaram valor acima do mínimo estabelecido pela AASHTO T283 (AASHTO, 2014). A Figura 6 apresenta os resultados de módulo de resiliência (MR) para as misturas asfálticas analisadas.

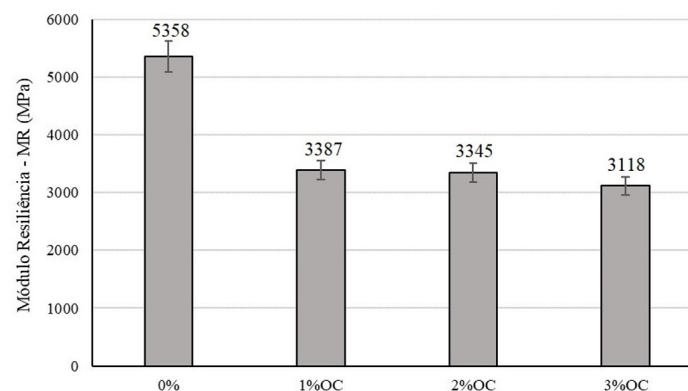


Figura 6. Resultados do módulo de resiliência (MR).

Vale salientar que a análise do módulo de resiliência não pode ser realizada de forma direta, visto que está relacionado à consistência da mistura. Maiores ou menores valores de MR podem ser aceitos, dependendo da estrutura do pavimento, considerando a compatibilidade de deformações entre as camadas que o constituem, principalmente a camada de base (Silva, 2011). Segundo Bernucci et al. (2022), valores típicos de MR para misturas asfálticas estão entre 2.000 e 8.000 MPa a 25 °C. Os resultados encontrados neste estudo para ligantes puros e misturas com o óleo de canola permaneceram dentro das faixas acima.

A Figura 7 apresenta as curvas mestras determinadas no ensaio de módulo dinâmico em temperatura de referência de 20 °C, utilizando três temperaturas (4, 20 e 40 °C) e seis frequências (25; 10; 5; 1; 0,5 e 0,1Hz).

Observou-se que a adição do óleo de canola proporcionou uma redução no valor do módulo de resiliência. Os valores de módulo de resiliência tenderam a diminuir à medida que se adicionou óleo de canola no ligante, expressando perda de consistência. Entretanto, a variação do teor de óleo de canola na mistura asfáltica não influenciou no desempenho do módulo de resiliência das misturas modificadas. A redução nos valores de MR com a adição do óleo de canola foi de 36,8%, 37,6% e 41,81% para os teores de 1%, 2% e 3% de óleo de canola.

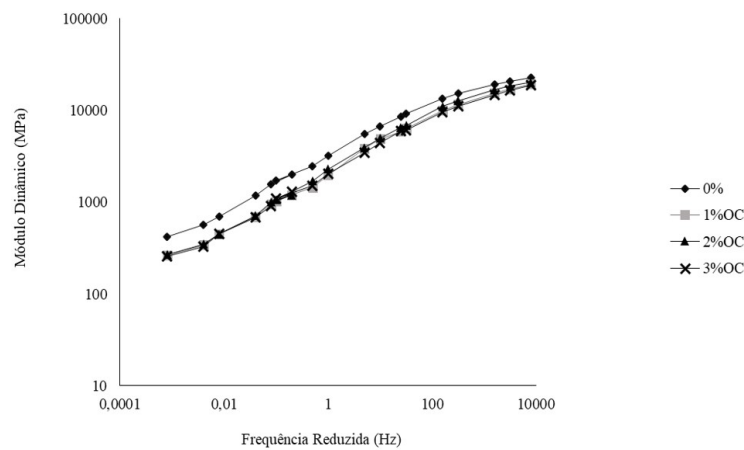


Figura 7. Curvas mestras das misturas asfálticas.

Todas as misturas asfálticas apresentaram redução de consistência devido ao aumento de temperatura, principalmente as misturas compostas por óleo de canola. Com os resultados da Figura 7 foi possível observar que as misturas asfálticas com e sem adição do óleo de canola apresentaram comportamentos semelhantes para as baixas temperaturas mantendo as mesmas características de módulo dinâmico. Porém, como já era esperado (Yu et al., 2018; Melo Neto et al., 2022a), as misturas modificadas com óleo de canola possuem maior sensibilidade à variação de temperaturas, diminuindo sua consistência para altas temperaturas. Fato esse observado na Figura 7, onde as amostras visivelmente apresentaram valores menores que a amostra de referência. A Figura 8 apresenta os valores médios do *flow number* (FN) das misturas asfálticas analisadas nesse estudo.

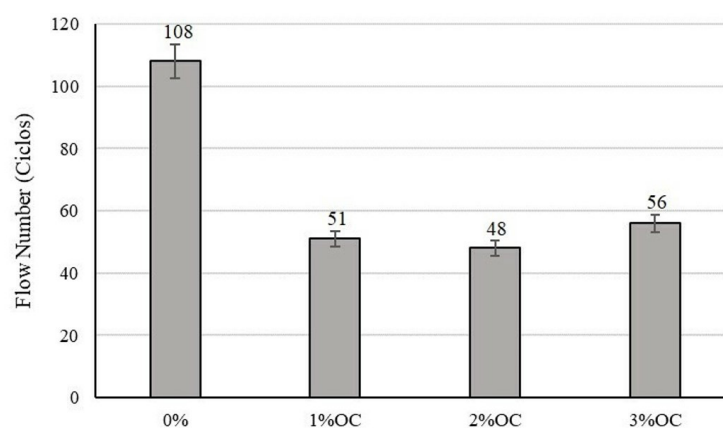


Figura 8. Valores do *flow number* obtidos pelo ensaio uniaxial de carga repetida.

Percebe-se que as misturas contendo óleo de canola apresentaram resultados inferiores de *flow number* da ordem de 48% a 55%, quando comparados à mistura asfáltica com ligante puro (0%). A redução já era esperada, visto que Carvalho et al. (2022) obteve resultados de *flow number* para as misturas asfálticas com adição de óleo de girassol inferiores ao da mistura tradicional utilizando apenas o ligante asfáltico puro. Moraes (2018) também apontou valores semelhantes ao incorporar cera de carnaúba nos teores de

1%, 3% e 5% em misturas asfálticas. Indicando assim que as misturas com adição de aditivos redutores de temperaturas possuem maior suscetibilidade à deformação permanente (Cavalcante, 2016; Carvalho, 2018; Moraes, 2018). A resistência à deformação permanente é uma das grandes preocupações no que se refere a misturas mornas, visto que as menores temperaturas de mistura e compactação resultam também em uma menor consistência inicial da mistura (Filho, 2013). Entretanto, esse achado não desvalida o uso do modificador em misturas asfálticas, pois seu emprego pode ser uma opção para uso em vias locais residenciais com baixa frequência de caminhões e ônibus, caracterizadas como vias de tráfego leve. A Figura 9 apresenta os resultados obtidos no ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em um diagrama log-log de N versus $\Delta\sigma$.

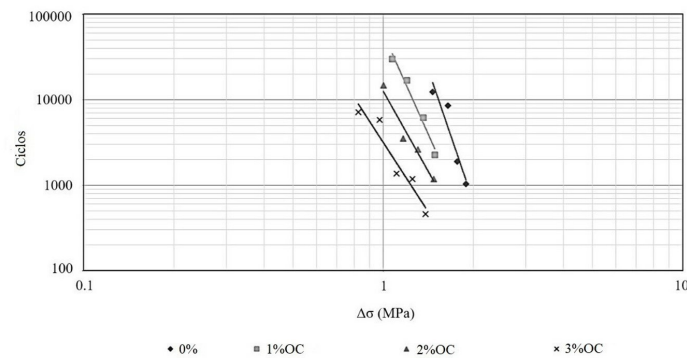


Figura 9. Número de ciclos até a ruptura versus a diferença de tensões no centro do corpo de prova.

Para analisar os gráficos de diferença de tensões, Morilha Jr (2004) classificou a vida de fadiga de misturas asfálticas em laboratório de acordo com os níveis de tensão alcançados durante o ensaio. Esta metodologia classifica os resultados em três níveis de diferença de tensões: 0,5 MPa (nível baixo); 1,0 MPa (nível médio) e 2,0 MPa (nível alto). Porém, apesar da mistura de referência apresentar maior resistência a altas tensões, a mesma apresenta uma maior sensibilidade à diferença de tensões para essas misturas. Assim, foi possível observar que, para todos os níveis de tensão, a mistura 1%OC foi a que apresentou o melhor desempenho de vida de fadiga, seguido pela mistura de 2%OC (com valores semelhantes) e por último a mistura 3%OC, ficando atrás apenas da mistura de referência. Esses resultados corroboram com a literatura, onde Carvalho et al. (2022) apontou resultados semelhantes ao adicionar óleo de girassol nos teores de 1%, 2% e 3%, com maior vida de fadiga para as misturas de referência e com 1% de óleo. Enquanto Moraes et al. (2022) apresentou a mistura convencional com ligante puro e a mistura com 3% de cera de carnaúba como as amostras com melhor desempenho na resistência à fadiga.

Este estudo mostrou o potencial do óleo de canola como redutor de viscosidade, onde foi observado temperaturas de mistura e compactação inferiores ao uso de outros óleos vegetais (copaíba, mamona, algodão, girassol e linhaça). Essa redução de viscosidade foi refletida na diminuição de resistência à tração, à deformação permanente, módulo de resiliência e módulo dinâmico, comportamento semelhante a estudos com óleos vegetais (Souza, 2012; Carvalho et al., 2022; Moraes et al., 2022). Entretanto, o uso do óleo de canola proporcionou uma maior adesividade à mistura asfáltica, acarretando maiores valores de resistência retida à tração e maior vida de fadiga para a amostra 1%OC. O uso de óleos vegetais tende a

melhorar a adesividade das misturas asfálticas (Souza, 2012; Carvalho et al., 2022; Moraes et al., 2022; Melo Neto et al., 2022a). Pesquisas (Barros, Lucena e Hernandez, 2022; Melo Neto et al., 2022a; 2022b; Costa et al., 2023) apontam o uso de óleos vegetais e residuais como agentes de reciclagem devido ao potencial de reduzir a viscosidade do ligante e seu poder antioxidante ao serem misturados. Dessa forma, com base nos dados de viscosidade e de FTIR, pode-se apontar um possível potencial desse modificador (óleo de canola) como agente de reciclagem para misturas asfálticas envelhecidas.

4. CONCLUSÕES

O objetivo principal desta pesquisa foi investigar os efeitos da adição do óleo de canola nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas. Observou-se que o teor de óleo influencia tanto nas propriedades mecânicas quanto na redução das temperaturas de mistura e compactação.

A adição do óleo de canola ao ligante asfáltico proporcionou aumento da penetração e redução nas temperaturas de ponto de amolecimento, confirmando a redução da consistência do ligante. As temperaturas de mistura reduziram linearmente com o aumento do teor de óleo obtendo uma diminuição máxima de 5,2 °C na temperatura de mistura para o teor de 3% de óleo de canola. Devido à pequena redução encontrada, estas misturas não podem ser classificadas como misturas asfálticas mornas, mas ainda assim proporcionam uma economia de energia durante o aquecimento do ligante asfáltico e dos agregados na usina de asfalto. Por meio da análise química, observou-se que o óleo de canola atuou como um antioxidante no ligante asfáltico.

Devido à diminuição da vida de fadiga e a redução de cerca de 50% do *flow number* em relação à mistura de referência, as misturas modificadas com óleo de canola devem ser analisadas criteriosamente caso a caso para viabilidade de sua aplicação. A implementação dessas misturas em vias de tráfego leve pode ser uma opção viável na prática. Aspectos positivos como o aumento da resistência à ação deletéria da água foram observados. Ademais, estudos abordando o uso do óleo de canola como agente de reciclagem de misturas asfálticas recicladas são indicados.

Este estudo se limitou apenas à análise da viscosidade rotacional quanto aos efeitos reológicos, indicando a necessidade de análises por meio de testes no reômetro, como os ensaios de *performance grade* (PG), *multiple stress creep recovery* (MSCR) e *linear amplitude sweep* (LAS) que podem trazer resultados mais aprofundados da influência do óleo de canola no desempenho reológico do ligante asfáltico e seu potencial para uso como agente de reciclagem em misturas asfálticas recicladas.

REFERÊNCIAS

- AASHTO (2014) *AASHTO T 283: Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*. Washington, DC, EUA: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Al-Omari, A.A.; T.S. Khedaywi e M.A. Khasawneh (2018) Laboratory characterization of asphalt binders modified with waste vegetable oil using SuperPave specifications, *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 11, n. 1, p. 68-76. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.09.004.
- ASTM (2010) *ASTM D 4791: Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate*. EUA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2014a) *ASTM C 131M: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. EUA: American Society for Testing and Materials.

- ASTM (2014b) *ASTM D 2419: Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate*. EUA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2015a) *ASTM C 127: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. EUA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2015b) *ASTM D 4402: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. EUA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2015c) *ASTM D 6925: Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Asphalt Mix Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor*. EUA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2018) *ASTM D 7653: Standard Test Method for Determination of Trace Gaseous Contaminants in Hydrogen Fuel by Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy*. EUA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2019) *ASTM D 2872: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*. EUA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2020a) *ASTM D 36M-14: Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. EUA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2020b) *ASTM D 5M: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. EUA: American Society for Testing and Materials.
- Barros, A.G.; L.C.F.L. Lucena e A.G. Herandez (2022) Addition of encapsulated soybean oil and waste cooking oil in asphalt mixtures: effects on mechanical properties and self-healing of fatigue damage, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 34, n. 4, p. 04022002. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004134.
- Barros, L.M. (2017) *Deformação Permanente de Misturas Asfálticas: Avaliação do Desempenho pelo Critério de Flow Number de Misturas Quentes e Mornas*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Bernucci, L.B.; L.M.G. Motta; J.A.P. Ceratti et al. (2022) *Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros*. (2a ed.). Rio de Janeiro: Abeda.
- Carvalho, J.R. (2018) *Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.
- Carvalho, J. R. (2022). *Avaliação de diferentes tecnologias de misturas asfálticas mornas com a incorporação de elevadas quantidades de material fresado*. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.
- Carvalho, J.R.; A.G. Barros; A.E.F.L. Lucena et al. (2022) Mechanical performance of asphalt mixture composed of asphalt binder modified with sunflower oil, *Revista Transportes*, v. 30, n. 3, p. 2703. DOI: 10.14295/transportes.v30i3.2703.
- Cavalcante, F.P. (2016) *Efeito da adição dos óleos de ricinus communis e linus usitatissimum nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo puro e modificado*. Tese (doutorado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.
- Costa, D.B.; O.M. Melo Neto; L.C.F.L. Lucena et al. (2023) Effects of recycling agents and methods on the fracture and moisture resistance of asphalt mixtures with high RAP contents, *Construction & Building Materials*, v. 367, p. 130312. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130312.
- DNIT (2006) *DNIT- 031/06-ME: Concreto asfáltico – Especificação de serviço*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte.
- DNIT (2018a) *DNIT-135/18-ME: Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte.
- DNIT (2018b) *DNIT-136/18-ME: Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte.
- DNIT (2018c) *DNIT-180/18-ME: Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte.
- DNIT (2018d) *DNIT-183/18-ME: Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte.
- DNIT (2018e) *DNIT-184/18-ME: Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente - Método de ensaio*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte.
- DNIT (2019) *DNIT-416/19- ME: Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte.
- Ferrotti, G.; D. Ragni; X. Lu et al. (2017) Effect of warm mix asphalt chemical additives on the mechanical performance of asphalt binders, *Materials and Structures*, v. 50, n. 5, p. 226. DOI: 10.1617/s11527-017-1096-5.

- Filho, N.W. (2013) *Avaliação da Influência da Redução das Temperaturas de Usinagem e de Compactação no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Mornas*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.
- Gao, J.; H. Wang; C. Liu et al. (2020) High-temperature rheological behavior and fatigue performance of lignin modified asphalt binder, *Construction & Building Materials*, v. 230, p. 117063. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117063.
- Gawel, I.; F. Czechowski e J. Kosno (2016) An environmental friendly anti-ageing additive to bitumen, *Construction & Building Materials*, v. 110, p. 42-47. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.004.
- Hu, X.; S. Fan; X. Li et al. (2020) Exploring the feasibility of using reclaimed paper-based asphalt felt waste as a modifier in asphalt-binders, *Construction & Building Materials*, v. 234, p. 117379. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117379.
- Melo Neto, O.M.; A.M.G.D. Mendonça; J.K.G. Rodrigues et al. (2022c) Rheological study of asphalt binder modified by cotton and copaiba oils, *Revista Cubana de Ingeniería*, v. 13, n. 1, p. e315. Disponível em: <<https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/816>> (acesso em: 02/11/2022).
- Melo Neto, O.M.; I.M. Silva; L.C.F.L. Lucena et al. (2022a) Viability of recycled asphalt mixtures with soybean oil sludge fatty acid, *Construction & Building Materials*, v. 349, p. 128728. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128728.
- Melo Neto, O.M.; I.M. Silva; L.C.F.L. Lucena et al. (2022b) Physical and rheological study of asphalt binders with soybean oil sludge and soybean oil sludge fatty acid, *Waste and Biomass Valorization*, v. 13, p. 1945-1967. DOI: 10.1007/s12649-022-01951-2.
- Mendonça, A.M.G.D.; O.M. Melo Neto; J.K.G. Rodrigues et al. (2022a) Characterisation of modified asphalt mixtures with lignin of pinus and eucalyptus woods, *Australian Journal of Civil Engineering*. In press. DOI: 10.1080/14488353.2022.2089376.
- Mendonça, A.M.G.D.; O.M. Melo Neto; J.K.G. Rodrigues et al. (2022b) Physicochemical and rheological effects of the incorporation of micronized polyethylene terephthalate in asphalt binder, *Petroleum Science and Technology*, v. 40, n. 7, p. 822-838. DOI: 10.1080/10916466.2021.2007124.
- Mendonça, A.M.G.D.; O.M. Melo Neto; J.K.G. Rodrigues et al. (2022c) Análise física-reológica de ligantes asfálticos modificados com óleo de algodão refinado para uso em misturas asfálticas mornas, *Revista Cubana de Ingeniería*, v. 13, n. 2, p. e325. Disponível em: <<https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/830>> (acesso em: 02/11/2022).
- Moraes, T.M.R.P. (2018) *Utilização da Cera de Carnaúba como Aditivo Redutor de Temperaturas de Usinagem e Compactação de Misturas Asfálticas*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.
- Moraes, T.M.R.P.; A.E.F.L. Lucena; O.M. Melo Neto et al. (2022) Efeitos do uso da cera de carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de mistura e compactação no desempenho mecânico de misturas asfálticas, *Revista Matéria*, v. 27, n. 4, p. e20220192. DOI: 10.1590/1517-7076-rmat-2022-0192.
- Mori, C.; G.O. Tomm and P.E.P. Ferreira. (2014). *Aspectos econômicos e conjunturais da cultura da canola no mundo e no Brasil*. Passo Fundo: Embrapa Trigo. (Embrapa Trigo, Documentos online, 149).
- Morilha Jr, A. (2004) *Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
- Palacio, C.H.P. e J.E.C. Maquillón (2013) Diseño de mezcla asfáltica tibia a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma, *Dyna*, v. 80, n. 179, p. 99-108.
- Porto, T.R.; A.E.F.L. Lucena; T.M.R.P. Moraes et al. (2023) The use of iron oxide in asphalt mixtures to reduce the effects of urban heat islands, *Case Studies in Construction Materials*, v. 18, p. e01709. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01709.
- Portugal, A.C.X.; L.C.F.L. Lucena; A.E.F.L. Lucena et al. (2017) Rheological properties of asphalt binders prepared with maize oil, *Construction & Building Materials*, v. 152, p. 1015-1026. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.077.
- Portugal, A.C.X.; L.C.F.L. Lucena; A.E.F.L. Lucena et al. (2018) Evaluating the rheological effect of asphalt binder modification using soybean oil, *Petroleum Science and Technology*, v. 36, n. 17, p. 1351-1360. DOI: 10.1080/10916466.2017.1322980.
- Rodrigues, F. (2016) *Produção mundial de óleos vegetais deve bater recorde em 2016*. BiodieselBR. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/noticias/materia-prima/soja1/producao-mundial-oleos-vegetais-deve-bater-recorde-2016-280916>> (acesso em: 02/11/2022).
- Sales, P.M. (2015) *Avaliação das Características Físicas e Mecânicas de Misturas Asfálticas Modificadas com Adição do CCBIT*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.
- Silva, C.C.V.P.; O.M. Melo Neto; J.K.G. Rodrigues et al. (2022) Evaluation of the rheological effect of asphalt binder modification using Linum usitatissimum oil, *Revista Matéria*, v. 27, n. 3, p. e20220138. DOI: 10.1590/1517-7076-rmat-2022-0138
- Silva, G.G. (2016) *Estudos Reológicos de Aditivos Utilizados na Fabricação de Misturas Mornas*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

- Silva, J.A.A. (2011) *Estudo das Propriedades Físicas, de Estado e Mecânicas de Misturas Asfálticas Párea os Revestimentos de Pista de Aeródromo*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.
- Souza, J.L.S. (2012) *Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado com Óleo de Mamona*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.
- Su, N.; F. Xiao; J. Wang et al. (2018) Productions and applications of bio-asphalts – a review, *Construction & Building Materials*, v. 183, p. 578-591. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.118.
- Uchoa, A.F.J.; W.S. Rocha; J.P.M. Feitosa et al. (2021) Bio-based palm oil as an additive for asphalt binder: chemical characterization and rheological properties, *Construction & Building Materials*, v. 285. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122883.
- Wang, C.; L. Xue; W. Xie et al. (2018) Laboratory investigation on chemical and rheological properties of bioasphalt binders incorporating waste cooking oil, *Construction & Building Materials*, v. 167, p. 348-358. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.038.
- Yu, H.; Z. Leng; Z. Dong et al. (2018) Workability and mechanical property characterization of asphalt rubber mixtures modified with various warm mix asphalt additives, *Construction & Building Materials*, v. 175, p. 392-401. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.218.