



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

CAROLYNE SOUSA VIEIRA

**AVALIAÇÃO DA AMIDA DE ÓLEO DE SOJA RESIDUAL COMO ADITIVO EM
MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS: IMPACTOS NA ADESIVIDADE E NAS
PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO LIGANTE ASFÁLTICO**

FORTALEZA

2025

CAROLYNE SOUSA VIEIRA

AVALIAÇÃO DA AMIDA DE ÓLEO DE SOJA RESIDUAL COMO ADITIVO EM
MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS: IMPACTOS NA ADESIVIDADE E NAS
PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO LIGANTE ASFÁLTICO

Trabalho final de curso apresentado ao Curso de
Graduação em Engenharia Química do Centro
de Tecnologia da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de Bacharelado em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Antônia Flávia Justino
Uchoa.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

V714a Vieira, Carolyne Sousa.

Avaliação da amida de óleo de soja residual como aditivo em misturas asfálticas mornas : impactos na adesividade e nas propriedades reológicas do ligante asfáltico / Carolyne Sousa Vieira. – 2025.
69 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Química, Fortaleza, 2025.

Orientação: Profa. Dra. Antônia Flávia Justino Uchoa.

1. Ligante asfáltico. 2. Amidas. 3. Óleos vegetais. 4. Misturas asfálticas. 5. Adesividade. I. Título.
CDD 660

CAROLYNE SOUSA VIEIRA

AVALIAÇÃO DA AMIDA DE ÓLEO DE SOJA RESIDUAL COMO ADITIVO EM
MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS: IMPACTOS NA ADESIVIDADE E NAS
PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO LIGANTE ASFÁLTICO

Trabalho final de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharelado em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Antônia Flávia Justino Uchoa.

Aprovada em: 19/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Antônia Flávia Justino Uchoa (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dr^a. Rílvia Saraiva de Santiago Aguiar
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jardel Andrade de Oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por Sua infinita graça, por me fortalecer em cada desafio e por me conceder a oportunidade de chegar até aqui.

Aos meus pais, pelo amor, compreensão e suporte ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. Em especial, à minha mãe e melhor amiga, Marcília, exemplo de força, dedicação e amor incondicional. Seu apoio, incentivo e carinho foram essenciais em cada etapa dessa caminhada. Sou imensamente grata por tudo que fez e continua fazendo por mim. Agradeço também a toda a minha família, que sempre me incentivou, e a todos que, mesmo de longe, torceram pelo meu sucesso.

Ao meu namorado, Davison, por todo carinho, paciência e incentivo ao longo dessa jornada, sempre me motivando a dar o meu melhor. Amo você.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP), que contribuíram de diversas formas para a realização deste trabalho, compartilhando conhecimentos e experiências valiosas.

À minha orientadora, Prof^a Dr^a Flávia, pela dedicação, pelos ensinamentos e pela orientação sempre precisa, fundamentais para o desenvolvimento deste estudo.

À Prof^a Dr^a Sandra, pela oportunidade proporcionada por meio da bolsa de Iniciação Científica, essencial para o meu crescimento acadêmico e profissional.

À Prof^a Dr^a Rílvia, por ministrar a disciplina de TFC e pelas orientações que ajudaram a tornar este trabalho possível.

A Leônia, Wesley e Johnny, pelos ensinamentos, pelo companheirismo e pelo suporte ao longo desta caminhada.

Ao Pedro e à Cynthia, por estarem ao meu lado ao longo desses anos, compartilhando desafios, alegrias e momentos que levarei sempre comigo.

À minha amiga de infância Mariane, por sempre me ouvir e estar ao meu lado.

A todos os colegas que fizeram parte da minha trajetória acadêmica, pelos momentos compartilhados, pelos aprendizados e pela construção conjunta dessa caminhada.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), pela estrutura e pelo ensino de qualidade que contribuíram para minha formação.

Ao CNPq e à FUNCAP, pelo suporte financeiro que viabilizou a realização deste estudo e fomentou a pesquisa científica.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para essa conquista, o meu mais sincero agradecimento.

RESUMO

A crescente busca por soluções sustentáveis na pavimentação tem impulsionado a investigação de aditivos renováveis para aprimorar as propriedades dos ligantes asfálticos. Este estudo avaliou o uso de amidas derivadas do óleo de soja de fritura (AOF) como aditivos em ligantes asfálticos, analisando seus impactos na redução das temperaturas de usinagem e compactação (TUC), na adesividade e nas propriedades reológicas do material. As amidas foram sintetizadas por meio da reação entre ésteres metílicos e etanolamina e incorporadas ao ligante em concentrações de 1%, 3% e 5% em massa. Os resultados indicam que a adição de 3% e 5% de AOF reduziu a viscosidade do ligante em até 26,2% e 35,2% a 135 °C, respectivamente, facilitando a aplicação em temperaturas mais baixas. A temperatura média de usinagem foi reduzida em 7 °C com 3% de AOF e em 9,5 °C com 5% de AOF em relação ao ligante puro, enquanto a temperatura de compactação apresentou reduções de 7 °C e 9,5 °C, respectivamente. Essas reduções refletem uma melhoria na eficiência energética do processo de pavimentação. Além disso, a modificação com AOF reduziu a rigidez do ligante, evidenciada pela diminuição do módulo complexo $|G^*|$, enquanto o aumento do ângulo de fase (δ) indicou um comportamento mais viscoso. A adesividade também foi significativamente aprimorada, com a área coberta pelo ligante nos agregados aumentando de 35,4% (LA puro) para 89,9% (LA + 3% AOF) e 93,7% (LA + 5% AOF). Esses resultados confirmam que as amidas de óleo de soja residual são uma alternativa viável para a modificação de ligantes asfálticos, promovendo a redução das temperaturas de usinagem e compactação, melhorando a adesividade e aumentando a sustentabilidade do processo de pavimentação.

Palavras-chave: ligante asfáltico; amidas; óleos vegetais; adesividade; misturas asfálticas.

ABSTRACT

The increasing demand for sustainable solutions in pavement engineering has driven research into renewable additives to enhance the properties of asphalt binders. This study evaluated the use of amides derived from waste soybean oil (AOF) as additives in asphalt binders, analyzing their effects on reducing mixing and compaction temperatures (MCT), adhesion, and rheological properties. The amides were synthesized through the reaction between methyl esters and ethanolamine and incorporated into the binder at concentrations of 1%, 3%, and 5% by mass. The results indicate that the addition of 3% and 5% AOF reduced binder viscosity by up to 26.2% and 35.2% at 135 °C, respectively, facilitating application at lower temperatures. The average mixing temperature was reduced by 7 °C with 3% AOF and by 9.5 °C with 5% AOF compared to the pure binder, while the compaction temperature decreased by 7 °C and 9.5 °C, respectively. These reductions reflect improved energy efficiency in the paving process. Additionally, AOF modification reduced binder stiffness, as evidenced by the decrease in the complex modulus $|G^*|$, while the increase in the phase angle (δ) indicated a more viscous behavior. Adhesion also improved significantly, with the binder-covered area on aggregates increasing from 35.4% (pure binder) to 89.9% (LA + 3% AOF) and 93.7% (LA + 5% AOF). These findings confirm that amides derived from waste soybean oil are a viable alternative for modifying asphalt binders, promoting lower mixing and compaction temperatures, improving adhesion, and enhancing the sustainability of the paving process.

Keywords: Asphalt binder; amides; vegetable oil; adhesion; mix asphalt.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura das frações do ligante asfáltico: saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos.....	17
Figura 2 – Teste em estufa de filme fino rotativo (<i>Rolling thin film oven test</i> – RTFOT).....	19
Figura 3 – Vaso de envelhecimento sob pressão (<i>Pressure aging vessel</i> - PAV).....	20
Figura 4 – Ligações e/ou interações a nível atômico/molecular de misturas asfálticas....	26
Figura 5 – Equação geral da transesterificação de um triglicerídeo.....	29
Figura 6 – Equação geral da reação de amidação.....	30
Figura 7 – Agregados dispostos em placa de fundo verde para DIP.....	35
Figura 8 – Interface do programa utilizado para o DIP (aplicado à amostra com LA+1% AOF).....	36
Figura 9 – Espectros de FTIR para AOP, AOF, OSP e OSF.....	37
Figura 10 – Espectros de RMN de ^{13}C para AOF e AOP (a) e espectros de RMN de ^1H para AOF e AOP (b).....	39
Figura 11 – Curvas TGA da AOP e AOF.....	40
Figura 12 – Curvas DSC da AOP e AOF.....	43
Figura 13 – Resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento.....	44
Figura 14 – Resultados de viscosidade rotacional dos ligantes puro e modificados, antes e após o envelhecimento a curto prazo, em diferentes temperaturas.....	46
Figura 15 – Curvas para cálculo das TUCs.....	47
Figura 16 – Curvas mestras do módulo complexo $ G^* $ (a, c) e ângulo de fase (δ) (b, d) em função da frequência angular (rad/s) para as amostras não envelhecidas de AOP (a, b) e AOF (c, d).....	50
Figura 17 – Curvas mestras do módulo complexo $ G^* $ (a, c) e ângulo de fase (δ) (b, d) em função da frequência angular (rad/s) para as amostras envelhecidas de AOP (a, b) e AOF (c, d).....	51

Figura 18 – Curvas mestras do módulo complexo $ G^* $ (a, c) e ângulo de fase (δ) (b, d) em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para as amostras não envelhecidas de AOP (a, b) e AOF (c, d).....	53
Figura 19 – Curvas mestras do módulo complexo $ G^* $ (a, c) e ângulo de fase (δ) (b, d) em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para as amostras envelhecidas de AOP (a, b) e AOF (c, d).....	54
Figura 20 – Evolução do nível de tráfego para amostras de ligante puro e modificado com AOP e AOF em diferentes temperaturas.....	55
Figura 21 – Análise da Integridade (C) em função do Dano Acumulado (D) para as amostras de ligantes puro e modificados.....	58
Figura 22 – Análise da resistência à fadiga em amostras de ligantes puro e modificados em diferentes deformações.....	59
Figura 23 – Resultados do teste de adesividade através do DIP fornecidos pelo programa.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais utilizados na pesquisa.....	28
Tabela 2 – Dados obtidos a partir das curvas DTG da AOP e da AOF.....	41
Tabela 3 – Faixa de temperatura de usinagem e compactação para a AOP.....	48
Tabela 4 – Faixa de temperatura de usinagem e compactação para a AOF.....	48
Tabela 5 – Indicação de níveis de tráfego para o ligante asfáltico puro e modificado com AOP e AOF.....	57
Tabela 6 – Dados do teste de adesividade através do DIP fornecidos pelo programa.....	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivo geral.....	16
2.2	Objetivos específicos.....	16
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	17
3.1	Ligante asfáltico.....	17
3.2	Envelhecimento de ligantes asfálticos.....	18
3.3	Misturas asfálticas.....	20
3.4	Aditivos para misturas asfálticas.....	22
3.5	Óleos vegetais como modificadores de ligantes asfálticos.....	23
3.6	Amidas como modificadores de ligantes asfálticos.....	24
3.7	Adesividade.....	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4.1	Materiais.....	27
4.2	Procedimentos.....	28
4.2.1	<i>Síntese de ésteres metílicos.....</i>	<i>28</i>
4.2.2	<i>Síntese de amida de ácidos graxos a partir de ésteres metílicos.....</i>	<i>29</i>
4.2.3	<i>Modificação do ligante asfáltico.....</i>	<i>30</i>
4.2.4	<i>Envelhecimento a curto prazo (RTFOT).....</i>	<i>30</i>
4.3	Caracterização das amidas.....	31
4.3.1	<i>Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).....</i>	<i>31</i>
4.3.2	<i>Ressonância Magnética Nuclear de ¹H e de ¹³C (RMN).....</i>	<i>31</i>
4.3.3	<i>Análise Termogravimétrica (TGA).....</i>	<i>31</i>
4.3.4	<i>Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....</i>	<i>31</i>
4.4	Caracterização dos ligantes asfálticos.....	32
4.4.1	<i>Ensaio de Ponto de Amolecimento (PA).....</i>	<i>32</i>
4.4.2	<i>Ensaio de Viscosidade Rotacional.....</i>	<i>32</i>
4.4.3	<i>Ensaio Reológicos em Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR).....</i>	<i>33</i>
4.4.4	<i>Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR).....</i>	<i>33</i>
4.4.5	<i>Ensaio de varredura de amplitude linear (LAS).....</i>	<i>34</i>
4.5	Adesividade.....	35

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
5.1	Caracterização das amidas.....	37
5.1.1	<i>Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).....</i>	37
5.1.2	<i>Ressonância Magnética Nuclear de ^1H e de ^{13}C (RMN).....</i>	38
5.1.3	<i>Análise Termogravimétrica (TGA).....</i>	40
5.1.4	<i>Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....</i>	42
5.2	Caracterização dos ligantes asfálticos.....	44
5.2.1	<i>Ensaio de Ponto de Amolecimento (PA).....</i>	44
5.2.2	<i>Ensaio de Viscosidade Rotacional.....</i>	45
5.2.3	<i>Ensaio Reológicos em Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR).....</i>	49
5.2.3.1	<i>Análise das propriedades dos ligantes asfálticos através do módulo complexo (G^*) e do ângulo de fase (δ) obtidos no ensaio de varredura de frequência.....</i>	49
5.2.3.2	<i>Análise das propriedades dos ligantes asfálticos através do módulo complexo (G^*) e do ângulo de fase (δ) obtidos no ensaio de varredura de temperatura..</i>	52
5.2.4	<i>Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR).....</i>	55
5.2.5	<i>Ensaio de varredura de amplitude linear (LAS).....</i>	57
5.3	Adesividade.....	59
6	CONCLUSÃO.....	62
	REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, instituições acadêmicas e industriais têm demonstrado crescente interesse por recursos renováveis, impulsionadas por questões econômicas e pela preocupação com impactos ambientais. Essa busca gerou uma demanda crescente por soluções que reduzam as emissões de gases de efeito estufa associadas ao uso de combustíveis fósseis.

A mistura asfáltica a quente, amplamente empregada na camada superficial de pavimentos, está sujeita a fatores externos como radiação ultravioleta, variações térmicas, oxigênio e água, que promovem alterações físicas e químicas e aceleram o envelhecimento do material. Esse processo causa endurecimento e fragilização da mistura (Chen *et al.*, 2024). Além disso, o ligante asfáltico, componente principal dessas misturas, sofre oxidação e perda de componentes voláteis essenciais durante o processo de usinagem e compactação realizado em altas temperaturas (Su *et al.*, 2018).

Como uma mistura orgânica complexa, o asfalto emite compostos orgânicos voláteis (VOCs) durante o manuseio em altas temperaturas, o que pode impactar a saúde dos operadores e o meio ambiente de forma contínua (Mo *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020). Diante disso, a indústria de pavimentação tem investido em soluções que atendam às exigências técnicas e ambientais, possibilitando a redução das temperaturas de produção e aplicação. Essas soluções diminuem a oxidação, o consumo energético e as emissões de gases de efeito estufa (Ferrotti *et al.*, 2017; Gao *et al.*, 2020), contribuindo para o desenvolvimento de pavimentos mais sustentáveis e de maior desempenho (Yu *et al.*, 2023).

Tecnologias como as misturas mornas, desenvolvidas com o uso de aditivos específicos, aumentam a durabilidade dos pavimentos ao reduzir temperaturas de produção e aplicação, minimizando o envelhecimento precoce do material (Cheraghian *et al.*, 2020; Portugal *et al.*, 2017). Esses aditivos atuam diminuindo a viscosidade do ligante asfáltico, permitindo que ele envolva os agregados da mistura em temperaturas mais baixas (Omari *et al.*, 2016).

Aditivos derivados de fontes renováveis têm sido amplamente estudados como modificadores de ligantes asfálticos (Ragni *et al.*, 2018; Bai *et al.*, 2019), com destaque para os aditivos derivados de óleos vegetais e seus compostos relacionados (Uchoa *et al.*, 2021). Apesar desses avanços, o custo elevado e a limitada disponibilidade de algumas fontes de aditivos ainda representam desafios importantes. Por isso, a busca por alternativas de baixo custo tem ganhado destaque na indústria rodoviária (Zhao *et al.*, 2023).

Para atender a esses desafios, as ceras de amidas de ácidos graxos têm se mostrado promissoras. Zhao *et al.*, (2023) relataram que o uso de uma amida derivada de óleo de cozinha residual contribuiu para a redução da energia de ativação do fluxo do asfalto e para o aumento da resistência à umidade e à deformação. Uchoa *et al.*, (2021) também observaram resultados positivos com a adição de amida de óleo de palma ao ligante asfáltico, que proporcionou menor viscosidade e possibilitou a usinagem e compactação em temperaturas reduzidas. Esses aditivos trazem benefícios técnicos, econômicos e ambientais, pois mesmo uma leve redução na temperatura de processamento gera economia de custos e diminui as emissões de fumaça e vapor (Uchoa *et al.*, 2021).

As ceras de amida de ácidos graxos são produzidas pela reação entre aminas e ácidos graxos, apresentando propriedades tensoativas excepcionais devido à presença de grupos polares amida e cadeias alifáticas apolares (Rodríguez-Alloza *et al.*, 2013; Nakhaei *et al.*, 2018). Essas características conferem melhorias na resistência à umidade, adesividade e durabilidade dos pavimentos, provavelmente devido à presença de grupos funcionais -NH nas cadeias de carbono (Qiu *et al.*, 2020). Isso torna as amidas uma alternativa viável para o setor de pavimentação (Qiu *et al.*, 2020).

O uso de óleos vegetais e óleos residuais como matéria-prima na produção de amidas se destaca pela origem renovável e pelo potencial de reduzir as emissões de carbono associadas aos ligantes asfálticos convencionais (Nogueira *et al.*, 2019; Uchoa *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2023). Essa abordagem promove a sustentabilidade ambiental e fortalece a economia circular, diminuindo a dependência de recursos não renováveis. Além disso, ao incorporar essas fontes alternativas, a indústria da construção civil contribui para um ambiente mais saudável e resiliente, alinhando-se aos objetivos globais de redução das emissões de gases de efeito estufa e adaptação às mudanças climáticas.

Esta pesquisa investiga o potencial das amidas derivadas de óleo de soja residual (AOF) como uma alternativa ambientalmente viável para melhorar as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos. O objetivo é reduzir as temperaturas de usinagem e compactação e aprimorar a adesividade, com base na análise das propriedades químicas e reológicas dos ligantes modificados. Ao contribuir para a redução das emissões de gases e promover o uso de fontes renováveis, esta pesquisa se alinha com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas - ONU, que visam um futuro mais sustentável e resiliente para as próximas gerações.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o potencial das amidas derivadas do óleo de soja residual como alternativas ambientais sustentáveis para melhorar as propriedades reológicas de ligantes asfálticos convencionais, buscando reduzir as temperaturas de usinagem e compactação, além de melhorar a adesividade.

2.2 Objetivos específicos

1. Desenvolver amidas como aditivos orgânicos de baixo custo e de fontes renováveis derivadas do óleo de soja residual.
2. Avaliar a eficácia das amidas de ácidos graxos na redução das temperaturas de usinagem e compactação dos ligantes asfálticos convencionais.
3. Analisar as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos modificados com amidas derivadas de fontes renováveis.
4. Examinar como as amidas provenientes do óleo de soja residual influenciam na adesividade do ligante asfáltico.

3 REVISÃO DA LITERATURA

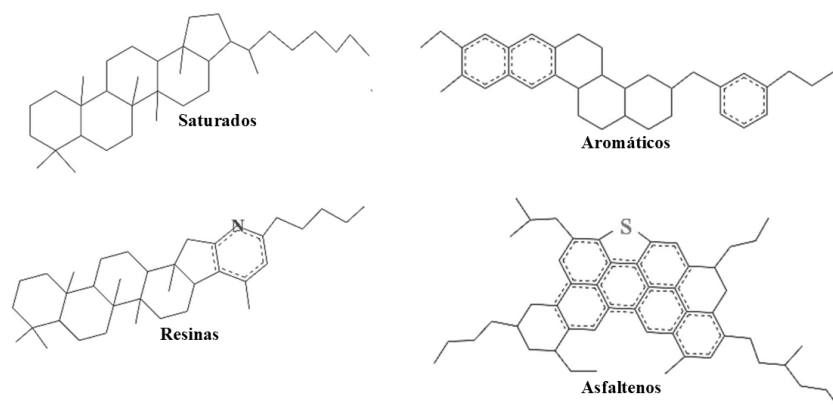
3.1 Ligante asfáltico

O termo "ligante asfáltico", também conhecido como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), refere-se ao asfalto obtido nas refinarias de petróleo e processado até atingir a consistência ideal para aplicação em pavimentação, devido às suas propriedades de adesividade e aglutinação dos agregados (Bernucci *et al.*, 2022).

O ligante asfáltico é um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e com baixa reatividade química, mas que sofre envelhecimento por oxidação ao contato com o ar e a água. Sua complexa composição química influencia sua toxicidade, resistência ao envelhecimento, adesão aos agregados, e desempenho físico e mecânico das misturas asfálticas. Esse material é semissólido em baixas temperaturas, viscoelástico em temperatura ambiente e líquido em altas temperaturas, atendendo aos limites de consistência definidos por especificações para aplicação em pavimentação (Bernucci *et al.*, 2022). Além disso, os ligantes asfálticos correspondem a 5% em massa das composições asfálticas, sendo os 95% restantes constituídos pelos agregados minerais.

A composição do ligante asfáltico é dividida em quatro frações principais conhecidas como SARA: Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos. Cada fração desempenha um papel específico e contribui com propriedades essenciais para o desempenho geral do ligante (Hu *et al.*, 2020). As estruturas representativas das quatro frações do ligante asfáltico são ilustradas na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura das frações do ligante asfáltico: saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos



Fonte: Adaptado de Yang *et al.*, (2023).

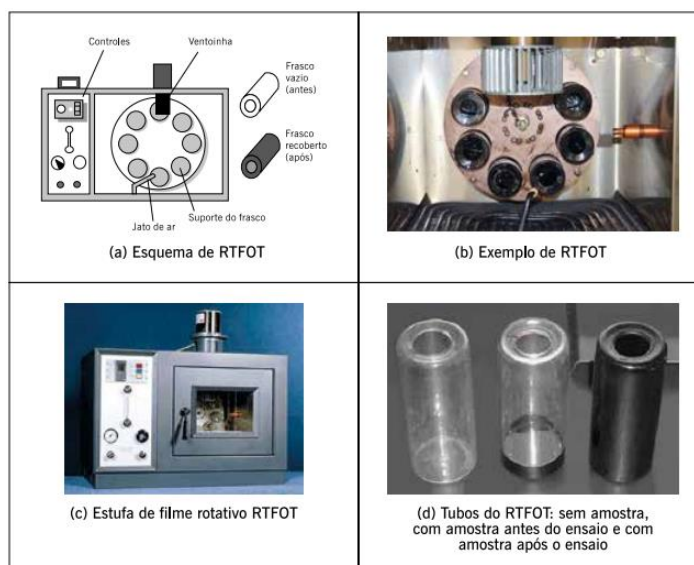
3.2 Envelhecimento de ligantes asfálticos

O envelhecimento de ligantes e misturas asfálticas ocorre em duas etapas: curto e longo prazo. O envelhecimento de curto prazo ocorre durante as fases de produção, transporte, assentamento e compactação da mistura. Já o envelhecimento de longo prazo é um processo contínuo que se desenvolve no campo ao longo da vida útil do pavimento, sendo principalmente influenciado por fatores climáticos (Ragni *et al.*, 2018).

Com o envelhecimento do ligante asfáltico, sua viscosidade aumenta, tornando-o mais rígido. Esse processo ocorre por meio de diversos mecanismos, como: oxidação (reação com oxigênio que causa endurecimento), volatilização (evaporação das frações leves em altas temperaturas), polimerização (formação de compostos de maior massa molecular), sinérese (separação de líquidos menos viscosos) e separação (remoção de constituintes pela adsorção em agregados porosos) (Moraes, 2014; Cravo, 2016). Essas transformações comprometem a flexibilidade e a adesividade do ligante, resultando em um pavimento mais suscetível a fissuras, deformações e falhas prematuras, o que reforça a necessidade de estratégias para mitigar seus efeitos e garantir maior durabilidade das estruturas rodoviárias.

Para analisar os efeitos do envelhecimento dos ligantes asfálticos em laboratório, são utilizados testes que simulam as condições enfrentadas pelo material, como o teste em estufa de filme fino rotativo (*Rolling Thin Film Oven Test* – RTFOT), ilustrado na Figura 2, que reproduz o envelhecimento a curto prazo (Lee *et al.*, 2009). Nesse ensaio, o ligante é aquecido em um filme fino e continuamente girado dentro de um recipiente de vidro a 163 °C por 85 minutos, com injeções de ar a cada 3 a 4 segundos, replicando as condições de mistura e compactação do pavimento, conforme a norma ASTM D2872 (2022). Esse procedimento permite avaliar mudanças nas propriedades físicas e químicas do ligante, como o aumento da viscosidade e o endurecimento, os quais se correlacionam com o endurecimento do material durante a usinagem da mistura asfáltica.

Figura 2 – Teste em estufa de filme fino rotativo (*Rolling thin film oven test – RTFOT*)



Fonte: Bernucci *et al.*, (2022).

Estudos de Bahia *et al.*, (1995) demonstram que o RTFOT é eficaz para prever o comportamento inicial do ligante após a mistura. Os autores mostram que esse teste fornece dados essenciais sobre a resistência do ligante à oxidação inicial e às mudanças físicas, fatores críticos para a durabilidade do pavimento. As propriedades medidas, como viscosidade, módulo de cisalhamento e resistência à tração, são importantes indicadores da qualidade do ligante após o envelhecimento de curto prazo (Yan *et al.*, 2017).

Além das pesquisas focadas na simulação do envelhecimento nas etapas de usinagem e compactação das misturas asfálticas, conforme apontado por Nascimento, (2015), outras investigações têm se concentrado na oxidação do ligante asfáltico. Esse processo está intimamente ligado ao envelhecimento que o pavimento sofre ao longo de sua vida útil e é influenciado por fatores ambientais, como a exposição à radiação UV, variações térmicas e níveis de umidade.

Diante disso, o ensaio em vaso de envelhecimento sob pressão (*Pressure Aging Vessel - PAV*), ilustrado na Figura 3, é amplamente utilizado para simular o envelhecimento prolongado do ligante em laboratório. Durante o teste, o ligante é submetido a condições controladas de pressão e temperatura por um período estendido, representando de maneira aproximada cerca de 10 anos de exposição ambiental (Bernucci *et al.*, 2022). Esse processo de oxidação permite avaliar as mudanças graduais nas propriedades do ligante, impactando diretamente a durabilidade e o desempenho da camada asfáltica ao longo do tempo.

Figura 3 – Vaso de envelhecimento sob pressão (*Pressure aging vessel* - PAV)



Fonte: Bernucci *et al.*, (2022).

O envelhecimento dos ligantes asfálticos é um processo complexo, resultado da interação de diversos mecanismos físicos e químicos. Compreender esses mecanismos é essencial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de manutenção e preservação dos pavimentos asfálticos.

3.3 Misturas asfálticas

As misturas asfálticas são amplamente utilizadas em pavimentação devido à sua versatilidade e durabilidade. No Brasil, as misturas asfálticas a quente (MAQ) são tradicionalmente aplicadas, mas, nos últimos anos, houve um aumento na adoção de misturas asfálticas mornas (MAM), motivado pelo interesse em melhorar a sustentabilidade e reduzir os impactos ambientais e operacionais da pavimentação asfáltica. Ambas as técnicas possuem características específicas, vantagens e desvantagens, que influenciam a escolha de sua aplicação em diferentes cenários de pavimentação (Motta, 2011; Wargha Filho, 2013).

A MAQ é uma técnica tradicional de pavimentação onde os agregados e o ligante asfáltico são aquecidos a temperaturas entre 140 °C e 180 °C. Essa temperatura é necessária para garantir a fluidez do ligante, permitindo o revestimento completo dos agregados e a adequada trabalhabilidade da mistura durante a aplicação e compactação (Bernucci *et al.*, 2022).

A mistura asfáltica a quente é conhecida por sua durabilidade e resistência, pois as altas temperaturas promovem uma excelente aderência entre o ligante e os agregados, criando uma camada de pavimento robusta e duradoura (Senior-Arrieta *et al.*, 2017). Embora eficaz, a MAQ exige um elevado consumo de energia e gera emissões significativas devido à necessidade de aquecimento intenso. Esse processo resulta em altos níveis de emissões de CO₂ e outros poluentes atmosféricos, contribuindo para o impacto ambiental da pavimentação (Li *et al.*, 2020). Além disso, as altas temperaturas envolvidas representam um risco ocupacional para os trabalhadores, expostos a vapores e calor intenso durante a produção e aplicação (Mo *et al.*, 2019). Consequentemente, os custos operacionais da MAQ tendem a ser mais altos devido à energia necessária para manter as temperaturas elevadas e as precauções de segurança adicionais exigidas.

As misturas asfálticas mornas, por outro lado, são produzidas e aplicadas a temperaturas mais baixas, entre 100 °C e 140 °C, utilizando aditivos que melhoram a trabalhabilidade da mistura em temperaturas reduzidas. A MAM foi introduzida como uma alternativa sustentável à MAQ, visando reduzir o consumo de energia e os impactos ambientais associados à fabricação e aplicação do asfalto (Motta, 2011). Por serem produzidas e aplicadas em temperaturas mais baixas, as misturas asfálticas mornas trazem uma significativa redução de emissões e consumo de energia em comparação com a MAQ. Essa redução permite que a MAM tenha um impacto ambiental menor e melhore as condições de trabalho, reduzindo os riscos à saúde dos trabalhadores. Outro benefício da MAM é a sua boa trabalhabilidade em climas frios, o que permite uma compactação de qualidade em condições de temperaturas baixas, sendo vantajosa em projetos realizados em regiões com variações climáticas.

A principal diferença entre a MAQ e a MAM é a temperatura de produção e aplicação, impactando o consumo de energia, a emissão de poluentes, a segurança ocupacional e o desempenho do pavimento. Embora a MAQ ainda seja a técnica predominante para rodovias de tráfego intenso devido à sua durabilidade e resistência bem comprovadas, a MAM representa uma alternativa interessante para locais com menos tráfego, especialmente quando a redução de emissões e a economia de energia são prioridades (Motta, 2011).

O desenvolvimento e a implementação das misturas asfálticas mornas refletem um avanço em direção a práticas mais sustentáveis e seguras em pavimentação. O estudo contínuo das propriedades e do desempenho das misturas mornas poderá expandir sua aplicação e proporcionar um entendimento mais profundo sobre seus benefícios e limitações.

3.4 Aditivos para misturas asfálticas

A utilização de aditivos derivados de fontes renováveis em misturas asfálticas tem ganhado relevância na engenharia de pavimentação, buscando melhorar as propriedades físicas e reológicas dos ligantes asfálticos e otimizar o desempenho do pavimento. Esses aditivos atuam para aumentar a durabilidade, resistência e estabilidade das misturas, além de contribuir para a sustentabilidade ao reduzir a necessidade de recursos não renováveis e minimizar o impacto ambiental do processo de pavimentação (Bernucci *et al.*, 2022).

Os aditivos químicos incluem polímeros, agentes antiaderentes e agentes plastificantes, cada um desempenhando papéis específicos. Polímeros como o SBS (Estireno-Butadieno-Estireno) são frequentemente incorporados ao ligante asfáltico para aumentar sua elasticidade e resistência ao trincamento, especialmente em regiões de alta variação térmica (Alataş *et al.*, 2013). Esses polímeros ajudam a controlar a deformação permanente e a fadiga, além de promover uma maior resistência ao envelhecimento e à oxidação. Outros aditivos, como os agentes antiaderentes, são adicionados para evitar a perda de aderência do ligante asfáltico aos agregados na presença de água, aumentando a vida útil do pavimento em condições de umidade elevada.

Os aditivos orgânicos, por outro lado, incluem ceras, óleos vegetais e produtos à base de lignina, derivados de materiais renováveis. Eles geralmente são utilizados para reduzir a viscosidade do ligante asfáltico em temperaturas elevadas, o que facilita o manuseio e aplicação da mistura asfáltica a temperaturas mais baixas, economizando energia e reduzindo emissões de gases (Omari *et al.*, 2016). As ceras orgânicas atuam como modificadores que reduzem a sensibilidade térmica do ligante, promovendo um desempenho mais consistente (Ragni *et al.*, 2018). Esse tipo de aditivo também facilita o uso de misturas mornas, que requerem menor energia térmica para sua aplicação e, portanto, são mais sustentáveis que as misturas convencionais.

Nesse contexto, a amida derivada de ácidos graxos, um modificador de viscosidade asfáltica de baixo peso molecular, mostra-se eficaz em prolongar a vida útil da camada superficial do pavimento, especialmente em condições de altas temperaturas (Senior-Arrieta *et al.*, 2017). Além disso, apresenta uma vantagem significativa em relação aos aditivos lineares de parafina ou cera de amida, ao proporcionar melhor retenção de flexibilidade em baixas temperaturas.

A escolha de aditivos químicos ou orgânicos depende de uma série de fatores,

incluindo as características climáticas, o tipo de tráfego e as condições locais do pavimento (Porto *et al.*, 2019). A utilização de aditivos na modificação dos ligantes asfálticos é uma abordagem essencial para aprimorar o desempenho dos pavimentos. Portanto, a seleção apropriada desses materiais pode estender a vida útil do pavimento, melhorar a resistência a condições climáticas extremas e reduzir os custos com manutenção.

3.5 Óleos vegetais como modificadores de ligantes asfálticos

Na indústria do asfalto, diversos estudos demonstraram que os bioaditivos derivados de óleos vegetais têm grande potencial para serem empregados como modificadores ou regeneradores de asfalto, proporcionando resultados promissores em termos de desempenho (Su *et al.*, 2015; Wen *et al.*, 2012). O óleo de soja é o segundo mais produzido e ofertado no mercado mundial de óleos vegetais, representando 27% do total. Também ocupa a segunda posição em consumo global, sendo que China, Estados Unidos e Brasil correspondem a 62% da demanda (Zeferino *et al.*, 2023).

Os óleos vegetais são compostos principalmente por triglicerídeos, que são formados por ácidos graxos e glicerol (Cong *et al.*, 2020). A maioria desses óleos contém ácidos graxos insaturados, como ácido palmítico, ácido esteárico, ácido oleico, ácido linoleico e ácido linolênico.

Devido às suas características renováveis e à ampla disponibilidade, os óleos vegetais e seus derivados modificados são matérias-primas ideais para a produção de resinas utilizadas na indústria (Islam *et al.*, 2014). Para aprimorar suas propriedades, esses óleos podem passar por processos de funcionalização como epoxidação, acrilção e transesterificação. Essas modificações permitem a introdução de grupos funcionais como epóxidos, acrilatos e ésteres, melhorando a interação do óleo com a matriz asfáltica e expandindo suas aplicações em diferentes setores industriais, incluindo embalagens, eletrônica, indústria automotiva, área médica e pavimentação asfáltica (Li *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2017).

Óleos vegetais são obtidos a partir de várias plantas por meio de processos físicos ou químicos. Em geral, existem dois tipos de óleos vegetais: óleos vegetais frescos e óleos vegetais residuais. Os óleos vegetais frescos são extraídos e refinados de matérias-primas vegetais. Eles são uma fonte básica de energia e uma parte essencial da dieta humana (Nde *et al.*, 2020). Já os óleos vegetais residuais são subprodutos dos óleos vegetais frescos, geralmente obtidos após o processo de fritura ou aquecimento em altas temperaturas. Esses

óleos não são comestíveis, possuem uma cor marrom escura e uma viscosidade maior em comparação aos óleos frescos (Ramadhanssy *et al.*, 2020). Devido ao processo de fritura e aquecimento, os óleos vegetais residuais sofrem degradação por hidrogenação e oxidação, o que altera o perfil de ácidos graxos, transformando os ácidos graxos poli-insaturados e insaturados em ácidos graxos saturados e monoinsaturados (Awogbemi *et al.*, 2019).

A má gestão dos óleos vegetais residuais pode resultar em sérios problemas, incluindo riscos à saúde pública, impactos ambientais negativos e danos à infraestrutura (Cárdenas *et al.*, 2021). Dada a considerável produção anual desses resíduos, seu reaproveitamento na modificação ou rejuvenescimento do asfalto surge como uma alternativa sustentável, proporcionando benefícios econômicos ao reduzir custos e ambientais ao minimizar o descarte inadequado.

Devido à estrutura peculiar dos triglicerídeos presentes nestes óleos, tanto os óleos vegetais frescos quanto os residuais podem ser utilizados diretamente em ligantes asfálticos. No processo de modificação do ligante asfáltico, as moléculas de óleo vegetal interagem fisicamente com as moléculas do asfalto, promovendo alterações em suas propriedades (Ji *et al.*, 2017).

Dessa forma, é fundamental dar continuidade aos estudos para otimizar as propriedades desses materiais e assegurar sua compatibilidade com ligantes asfálticos convencionais, viabilizando, assim, uma alternativa sustentável e eficaz ao uso de derivados de petróleo.

3.6 Amidas como modificadores de ligantes asfálticos

Por muitos anos, o desempenho do ligante asfáltico convencional foi considerado satisfatório (Silva *et al.*, 2018). No entanto, com o aumento do tráfego veicular e as intensas variações climáticas, tornou-se essencial o uso de materiais modificadores para melhorar as propriedades das misturas asfálticas. Nesse contexto, as amidas derivadas de ácidos graxos se destacam por sua alta polaridade, permitindo a formação de ligações químicas estáveis com os agregados (Liu *et al.*, 2025). No ligante asfáltico, componentes polares, como asfaltenos e resinas, possuem grupos funcionais que interagem com as amidas por meio de ligações de hidrogênio (Liu *et al.*, 2025). Essa interação melhora a adesividade e a coesão do material, resultando em misturas asfálticas mais duráveis e resistentes.

As amidas de ácidos graxos, especialmente as sintetizadas a partir de óleos vegetais, apresentam características que as tornam atraentes como aditivos asfálticos. Com

compostos de baixo peso molecular, essas amidas têm mostrado reduzir as temperaturas de usinagem e compactação, facilitando a trabalhabilidade e aplicação do ligante durante o processo de pavimentação (Uchoa *et al.*, 2021).

Essas amidas de ácidos graxos são obtidas pela reação entre aminas e ácidos graxos, resultando em uma ampla variedade de estruturas químicas (Rodríguez-Alloza *et al.*, 2013). Estudos indicam que esses materiais podem aumentar a resistência à umidade, possivelmente devido à presença de grupos funcionais -NH nas cadeias de carbono. Como resultado, as amidas apresentam um grande potencial como aditivos para ligantes asfálticos, melhorando a viscosidade, adesividade e durabilidade do material (Qiu *et al.*, 2020).

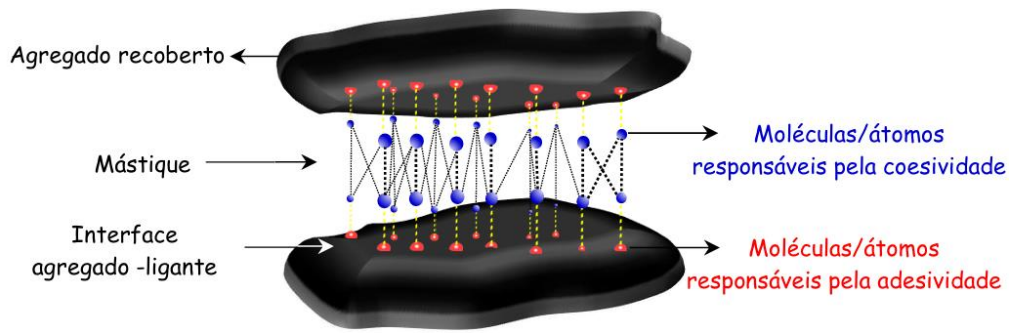
Adicionalmente, a sustentabilidade das amidas derivadas de ácidos graxos, obtidas a partir de fontes renováveis, como os óleos vegetais residuais, posiciona esses aditivos como uma alternativa ambientalmente amigável aos modificadores tradicionais. Isso atende à crescente demanda por soluções sustentáveis na indústria de pavimentação.

3.7 Adesividade

A adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados minerais é um fator crucial para a durabilidade e o desempenho das misturas asfálticas (Gomes *et al.*, 2024). Essa propriedade está diretamente relacionada à capacidade do ligante de aderir à superfície do agregado, resistindo a condições adversas, como tráfego intenso, variações climáticas e, principalmente, à presença de umidade. Uma boa ligação entre o ligante e o agregado é essencial para garantir a resistência da mistura à ação da água, prevenindo problemas como o *stripping*, que resulta da perda de adesão devido à infiltração de umidade (Neves Filho, 2006).

A adesão entre o ligante e o agregado é influenciada por vários fatores, incluindo a química dos materiais, a natureza do agregado e a qualidade do ligante asfáltico (Arabani *et al.*, 2012; Hossain *et al.*, 2015). Nas misturas asfálticas, o mecanismo de ligação é determinado por duas interações físico-químicas: (i) adesão e (ii) coesão. A adesão refere-se à ligação e/ou interação intermolecular e/ou interatômica entre a película asfáltica e a superfície do agregado. Já a coesão está relacionada à resistência das ligações e/ou interações intermoleculares e/ou interatômicas no ligante e/ou mástique, conforme ilustrado na Figura 4 (Lucas Júnior, 2018).

Figura 4 - Ligações e/ou interações a nível atômico/molecular de misturas asfálticas



Fonte: Lucas Júnior, 2018.

A adesividade agregado-ligante tem influência direta nos mecanismos internos de uma mistura asfáltica (Gomes *et al.*, 2024). Por isso, é fundamental considerar a química da superfície dos agregados e dos ligantes para garantir uma adesão ideal, uma vez que diferentes combinações de materiais podem apresentar variações significativas no comportamento adesivo (Huang *et al.*, 2010).

Para entender o fenômeno da adesividade, diversas teorias foram aplicadas, como a interação molecular, a reação química, a energia livre de superfície (*Surface Free Energy* - SFE) e a dinâmica molecular (Ji *et al.*, 2017). O método de SFE tem se destacado por quantificar a energia de adesão e coesão nos sistemas ligante-agregado, medindo a energia necessária para romper a interface adesiva e fornecendo uma visão quantitativa sobre a interação entre os materiais (Habal *et al.*, 2017).

Outro método importante é o teste de resistência ao arrancamento do ligante (*Bitumen Bond Strength* - BBS), amplamente utilizado para avaliar a força de ligação entre o ligante e o agregado, tanto em condições secas quanto após submersão. O teste BBS permite classificar os tipos de falha ocorridos durante o ensaio como adesiva, coesiva ou adesivo-coesiva (Moraes, 2011).

Os testes BBS e SFE são complementares, oferecendo uma análise detalhada da interface agregado-ligante. Moraes, (2011) observou uma boa correlação entre os dois métodos, enquanto Habal *et al.*, (2017) demonstraram que a resistência ao arrancamento medida pelo BBS está diretamente relacionada aos parâmetros de energia interfacial obtidos pelo SFE. No entanto, os resultados podem variar dependendo do tipo de agregado utilizado e dos padrões de falha observados.

A avaliação e a melhoria da adesividade são essenciais para garantir o desempenho e a durabilidade das misturas asfálticas. Portanto, entender e otimizar a adesividade dos ligantes asfálticos é fundamental para o desenvolvimento de misturas mais

resistentes à ação da água e ao tráfego, contribuindo para a durabilidade e o custo-benefício das obras de pavimentação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Neste trabalho, foi utilizado o ligante asfáltico puro PEN 50/70 fornecido pela Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste (Lubnor – Petrobras). O óleo de soja puro (OSP) foi adquirido em um mercado local, enquanto o óleo de soja de fritura (OSF) foi obtido a partir do uso doméstico. As amidas foram sintetizadas a partir dos ésteres metílicos do óleo de soja, obtidos após reações com o óleo de soja puro e com o óleo residual de fritura. O ligante asfáltico foi modificado com concentrações de 1%, 3% e 5% das amidas, oriundas tanto do óleo de soja puro (AOP) quanto do óleo de soja de fritura (AOF). A AOP foi sintetizada como um controle para permitir a comparação direta com a AOF, uma vez que o óleo de soja de fritura sofre degradação térmica e oxidativa durante o uso, resultando em alterações químicas que podem influenciar as propriedades reológicas do ligante asfáltico modificado. Dessa forma, a comparação entre AOP e AOF possibilita avaliar o impacto dessas modificações estruturais no desempenho do ligante.

A proporção de 3% foi estudada por Uchoa *et al.*, (2021), com resultados promissores na redução de viscosidade e melhoria das propriedades reológicas do ligante. As concentrações de 1% e 5% foram incluídas para validar e expandir esses achados, avaliando se pequenas quantidades de amida (1%) geram melhorias com menor custo ou se maiores concentrações (5%) potencializam os efeitos ou causam impactos adversos, como aumento excessivo de viscosidade. Todos os produtos químicos utilizados estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Materiais utilizados na pesquisa

Material	Fornecedor
Álcool metílico	Synth
Asfalto puro (PEN 50/70)	Lubnor (Petrobras)
Clorofórmio deuterado	Merck
Etanolamina	Synth
Hidróxido de potássio	Dinâmica
Metóxido de sódio	LMP
Sulfato de sódio anidro	Synth
Óleo de soja puro	Soya
Óleo de soja de fritura	Uso doméstico

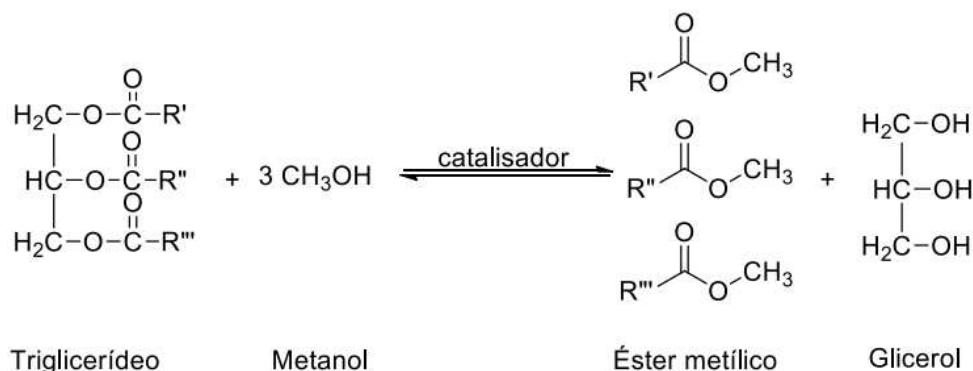
Fonte: Elaborada pela autora.

4.2 Procedimentos

4.2.1 Síntese de ésteres metílicos

Os ésteres metílicos foram obtidos com base no método descrito por Uchoa *et al.*, (2021), com algumas adaptações. A reação foi realizada da seguinte maneira: em um erlenmeyer, foram adicionados 40 g de álcool metílico PA e 2 g de hidróxido de potássio, a fim de formar o metóxido de potássio como catalisador. A mistura foi mantida sob agitação constante à temperatura ambiente até a dissolução completa do hidróxido de potássio. Posteriormente, o catalisador obtido foi adicionado a um erlenmeyer contendo 200 g de óleo de soja puro. Essa nova mistura foi mantida em uma placa de aquecimento com agitação magnética constante, à temperatura de 40 °C, por 45 minutos para promover a reação de transesterificação. A Figura 5 mostra a equação geral da transesterificação.

Figura 5 – Equação geral da transesterificação de um triglicerídeo



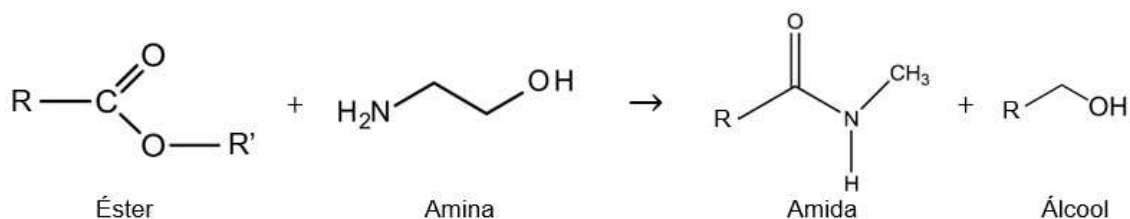
Fonte: Elaborada pela autora.

Após o período de reação, a mistura foi transferida para um funil de decantação para a separação dos ésteres e do glicerol. Depois de 30 minutos de repouso, observou-se a formação de duas fases: uma fase clara, correspondente aos ésteres metílicos, e uma fase escura, correspondente ao glicerol. Após um repouso adicional de 7 horas, procedeu-se à separação das fases. A fase de glicerol foi coletada em um béquer, enquanto os ésteres foram submetidos a múltiplas lavagens com água destilada no próprio funil de decantação, até sua completa neutralização. Por fim, os ésteres foram secos com sulfato de sódio anidro e, posteriormente, em ambiente de vácuo para remoção completa da umidade. Lembrando que todas as etapas também foram realizadas com o óleo de soja de fritura.

4.2.2 Síntese de amida de ácidos graxos a partir de ésteres metílicos

A síntese da amida a partir do óleo de soja puro foi realizada conforme descrito a seguir: 35 g de etanolamina e 1 g de metóxido de sódio foram adicionados a um balão de três bocas, imerso em banho de glicerina à temperatura ambiente, até completa dissolução. A mistura foi mantida sob agitação por 30 minutos. Em seguida, o banho foi aquecido a 75 °C, e os ésteres metílicos foram adicionados lentamente, gota a gota, mantendo-se a agitação por mais 30 minutos. Posteriormente, a temperatura foi elevada para 135 °C, mantendo-se a agitação constante por 2 horas. Após o processo, o produto foi resfriado, e o excesso de amina e álcool foi removido utilizando um evaporador rotativo. A Figura 6 representa a equação geral da reação de amidação.

Figura 6 – Equação geral da reação de amidação



Fonte: Elaborada pela autora.

4.2.3 Modificação do ligante asfáltico

O ligante asfáltico foi modificado com amida de óleo de soja puro (AOP) e amida de óleo de soja de fritura (AOF), ambas adicionadas nas concentrações de 1%, 3%, e 5% em massa em relação ao ligante asfáltico. As misturas resultantes foram designadas como: LA + 1% AOP, LA + 3% AOP, LA + 5% AOP, e LA + 1% AOF, LA + 3% AOF, LA + 5% AOF. A modificação foi realizada utilizando um agitador de baixo cisalhamento IKA (modelo RW20), operando a 1500 ± 5 rpm por 1 hora a uma temperatura de 130 ± 5 °C. A escolha dessas proporções visa explorar o potencial das amidas em aprimorar as propriedades reológicas e adesivas do ligante, contribuindo para o aumento da durabilidade do pavimento.

4.2.4 Envelhecimento a curto prazo (RTFOT)

O ligante asfáltico, tanto o puro quanto os modificados, foi submetido ao ensaio de envelhecimento oxidativo na estufa de filme fino rotativa (RTFOT - *Rolling Thin Film Oven Test*), replicando as condições do processo de usinagem, conforme especificado na norma ASTM D2872 (2022). O RTFOT simula o envelhecimento que ocorre durante os processos de usinagem e compactação de pavimentos asfálticos.

O procedimento experimental consistiu em dispor seis vasos cilíndricos de vidro, cada um contendo 35 g de ligante asfáltico, em uma prateleira vertical rotativa. Ao longo de 85 minutos, o ligante foi distribuído pela superfície interna de cada recipiente, formando uma película. Durante o ensaio, ar pré-aquecido foi periodicamente injetado nos recipientes. As amostras permaneceram em rotação constante a uma temperatura de 163 °C, com ventilação adequada, de acordo com os parâmetros definidos pela norma.

4.3 Caracterização das amidas

4.3.1 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

As amostras utilizadas neste estudo foram analisadas por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), utilizando um espectrômetro *Shimadzu* modelo *IR-Prestige* com resolução de 4 cm^{-1} , na faixa de números de onda de 400 a 4000 cm^{-1} , para acompanhar as mudanças químicas durante a síntese dos aditivos e produtos de reação intermediados.

4.3.2 Ressonância magnética nuclear de ^1H e de ^{13}C (RMN)

Os espectros de RMN de ^1H e de ^{13}C foram adquiridos utilizando um espectrômetro *Bruker*, modelo *Avance DRX-300*, operando a 300 MHz para RMN de ^1H . Cerca de 30 mg de cada amostra foram pesados e dissolvidos em $60\text{ }\mu\text{L}$ de clorofórmio deuterado (CDCl_3), com as medições conduzidas à temperatura ambiente. Os sinais presentes nos espectros de ^1H e de ^{13}C foram analisados para determinar a composição e as características estruturais dos compostos em estudo. Esta técnica fornece uma excelente plataforma para análise e caracterização de produtos de reação.

4.3.3 Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise da estabilidade térmica dos aditivos mede a variação de massa de um material em função da temperatura ou do tempo, enquanto ele é aquecido, resfriado ou mantido em uma temperatura constante. Foi realizada utilizando o equipamento TGA Q-50 da TA Instruments (EUA). Aproximadamente $15,0\text{ mg}$ de cada amostra foram acondicionados em placas de alumínio e submetidos a uma atmosfera de ar sintético com fluxo de 40 mL/min . O ensaio foi conduzido no intervalo de temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$ a $700\text{ }^\circ\text{C}$, com uma taxa de aquecimento controlada de $10\text{ }^\circ\text{C/min}$.

4.3.4 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A análise de DSC mede as diferenças de fluxo de calor entre uma amostra e uma referência em função da temperatura ou do tempo. Ela detecta eventos endotérmicos

(absorção de calor) e exotérmicos (liberação de calor) que ocorrem no material durante o aquecimento ou resfriamento.

As transições térmicas dos aditivos foram investigadas utilizando o equipamento DSC-50 da TA Instruments (EUA). Aproximadamente 10,0 mg de cada amostra foram seladas em placas específicas para DSC. Inicialmente, as amostras foram resfriadas de 25 °C a -50 °C, e posteriormente aquecidas até 200 °C. Tanto o resfriamento quanto o aquecimento foram conduzidos a uma taxa de 10 °C/min, sob uma atmosfera de nitrogênio com fluxo controlado de 40 mL/min.

4.4 Caracterização dos ligantes asfálticos

4.4.1 Ensaio de Ponto de Amolecimento (PA)

O ponto de amolecimento é uma propriedade empírica do asfalto que está diretamente relacionada à sua consistência e à temperatura. Como o asfalto não possui um ponto de fusão claramente definido devido à sua composição complexa, o ponto de amolecimento é usado como um parâmetro indicador da temperatura em que o material sofre amolecimento significativo.

O ensaio consiste em aquecer gradualmente, a uma taxa de 5 °C por minuto, dois anéis contendo amostras de asfalto, cada um suportando uma esfera padronizada. Os anéis são imersos em um banho de água destilada durante o procedimento. O ponto de amolecimento é determinado pela temperatura em que a amostra começa a fluir, tornando-se incapaz de sustentar o peso da esfera. Essa temperatura é registrada no momento em que as esferas tocam o fundo do suporte do ensaio. Para assegurar a precisão do teste, a diferença de temperatura entre os dois anéis não pode ultrapassar 2 °C.

Regulamentado pela norma ASTM D36/D36M (2014), esse procedimento é essencial para avaliar a adequação do asfalto em diferentes aplicações, especialmente no que diz respeito à sua sensibilidade a variações de temperatura, garantindo maior confiabilidade no seu uso em pavimentação e outras aplicações.

4.4.2 Ensaio de Viscosidade Rotacional

A determinação da viscosidade foi realizada com o uso de um viscosímetro rotacional *Brookfield*, modelo DVII+, equipado com um controlador de temperatura

Thermosel, conforme os procedimentos descritos na norma ASTM D4402/D4402M (2023). O ensaio iniciou com a pesagem de $8,0 \pm 0,5$ g das amostras de ligante, tanto puro quanto modificado, que foram transferidas para cubetas metálicas específicas para a análise.

As medições de viscosidade foram conduzidas nas temperaturas de 120 °C, 135 °C, 150 °C e 177 °C, utilizando uma velocidade de rotação de 20 rpm. Para garantir a precisão, foram realizadas três leituras por rotação em cada amostra, empregando o *spindle* 21 como padrão para todas as análises.

4.4.3 Ensaio Reológicos em Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR)

Os ensaios reológicos foram realizados em um Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR), modelo *Discovery HR-3* da *TA Instruments*. Os principais parâmetros reológicos, módulo complexo ($|G^*|$) e ângulo de fase (δ), foram determinados por meio de ensaios de varredura de frequência e de temperatura, abrangendo uma faixa de 1 a 160 rad/s. As análises foram conduzidas em diferentes temperaturas, variando de 46 °C a 82 °C, utilizando a configuração de placas paralelas com diâmetro de 8 mm e gap de 2 mm para baixas temperaturas, e com diâmetro de 25 mm e gap de 1 mm para altas temperaturas, em conformidade com a norma ASTM D7175/D7175M (2023).

Os dados obtidos foram utilizados para a construção de curvas mestras, considerando uma temperatura de referência de 60 °C. A construção das curvas foi baseada no modelo de superposição tempo-temperatura de Arrhenius, permitindo a avaliação detalhada da evolução das propriedades viscoelásticas do material em função da frequência e da temperatura. Essas curvas forneceram uma análise aprofundada do comportamento reológico do material testado.

4.4.4 Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR)

O ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (*Multiple Stress Creep and Recovery* - MSCR) consiste na aplicação de uma tensão cisalhante constante por um período de 1 segundo, seguida de uma fase de recuperação de 9 segundos. Durante cada ciclo de 10 segundos, são realizadas diversas medições da deformação na amostra. As variáveis analisadas nesse ensaio incluem: deformação inicial (ϵ_0), deformação no final do carregamento (ϵ_c) e deformação no final do período de recuperação (ϵ_r).

Com base nessas medições, é possível determinar dois parâmetros fundamentais: o percentual de recuperação (R) e a compliância não recuperável (J_{nr}). O percentual de recuperação (R) reflete a capacidade do material de retornar à sua forma original após a remoção da carga e é calculado utilizando a Equação 1. Já a compliância não recuperável (J_{nr}), que representa a deformação permanente da amostra, é obtida pela relação entre a deformação no final da recuperação (ϵ_r) e a tensão aplicada, conforme a Equação 2. Esses parâmetros são cruciais para avaliar o desempenho viscoelástico do material sob condições de carregamento repetitivo.

$$R = \frac{(\epsilon_c - \epsilon_r) * 100}{\epsilon_c - \epsilon_0} \quad (1)$$

$$J_{nr} = \frac{\epsilon_c - \epsilon_r}{\tau} \quad (2)$$

O ensaio foi realizado em duas etapas, com variação da tensão aplicada: 0,1 kPa (20 ciclos) e 3,2 kPa (10 ciclos). Essa abordagem permite avaliar a resposta do material sob diferentes níveis de carregamento, sendo essencial para compreender a relação entre o comportamento reológico e a resistência à deformação permanente. O procedimento seguiu os critérios estabelecidos pelas normas AASHTO M320 (2017), AASHTO M332 (2018), ASTM D7405 (2020) e DNIT 423-ME (2020) e foi conduzido em uma faixa de temperaturas de 52 °C a 82 °C, com incrementos de 6 °C.

4.4.5 Ensaio de varredura de amplitude linear (LAS)

O ensaio de *Linear Amplitude Sweep* (LAS) foi realizado conforme a norma AASHTO TP 101 (2014). As amostras, previamente envelhecidas por RTFOT, foram analisadas em um reômetro equipado com geometria de placas paralelas de 8 mm de diâmetro e espaçamento (gap) de 2000 µm. O procedimento do ensaio foi dividido em duas etapas: (1) uma varredura de frequência, variando entre 0,1 e 30 Hz, para avaliar as propriedades reológicas na região de viscoelasticidade linear, com uma amplitude de deformação fixa em 0,1%; e (2) uma varredura de amplitude de deformação, variando de 0,1 a 30%, realizada a uma frequência constante de 10 Hz.

Durante a varredura de amplitude, o carregamento foi aplicado em intervalos de 10 segundos com amplitudes de deformação constantes, sendo cada intervalo seguido por

outro com uma amplitude maior. Os dados obtidos foram analisados utilizando o modelo de dano contínuo viscoelástico, além da avaliação do índice de tolerância a danos, proporcionando uma análise detalhada do comportamento do material frente a deformações progressivas.

4.5 Adesividade

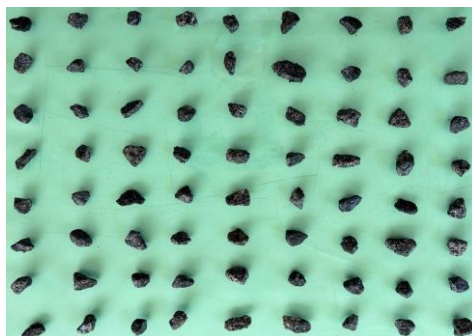
A adesividade entre o agregado e o material betuminoso é a capacidade do agregado de manter a película de ligante betuminoso aderida à sua superfície. Essa propriedade é avaliada observando se a película de ligante permanece intacta, mesmo após a mistura agregado-ligante ser exposta à ação da água destilada a 40 °C por 72 horas.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma DNER-ME 078/94 (1994). Para isso, foi preparada uma amostra de 500 g de agregado, composta por partículas que passaram na peneira de 19 mm e foram retidas na peneira de 12,7 mm. O agregado foi lavado com água, imerso em água destilada e, em seguida, seco em uma estufa a 120 °C por 2 horas.

Depois de preparado, o agregado e o ligante betuminoso foram aquecidos, se necessário, à temperatura especificada pela norma. Em seguida, 17,5 g de ligante foram adicionados ao agregado, e ambos foram misturados com o auxílio de uma espátula até que o agregado estivesse completamente coberto pelo ligante.

A mistura foi colocada sobre uma superfície lisa, permitindo que o ligante esfriasse. Após o resfriamento, o material foi transferido para um frasco de vidro, onde foi totalmente submerso em água destilada. O frasco foi mantido em uma estufa a 40 °C por 72 horas para concluir o ensaio. Em seguida, cada agregado foi disposto em uma placa com fundo verde para captura de imagens (Figura 7), permitindo a análise da área de cobertura dos ligantes através do DIP.

Figura 7 – Agregados dispostos em placa de fundo verde para DIP



Fonte: Elaborada pela autora.

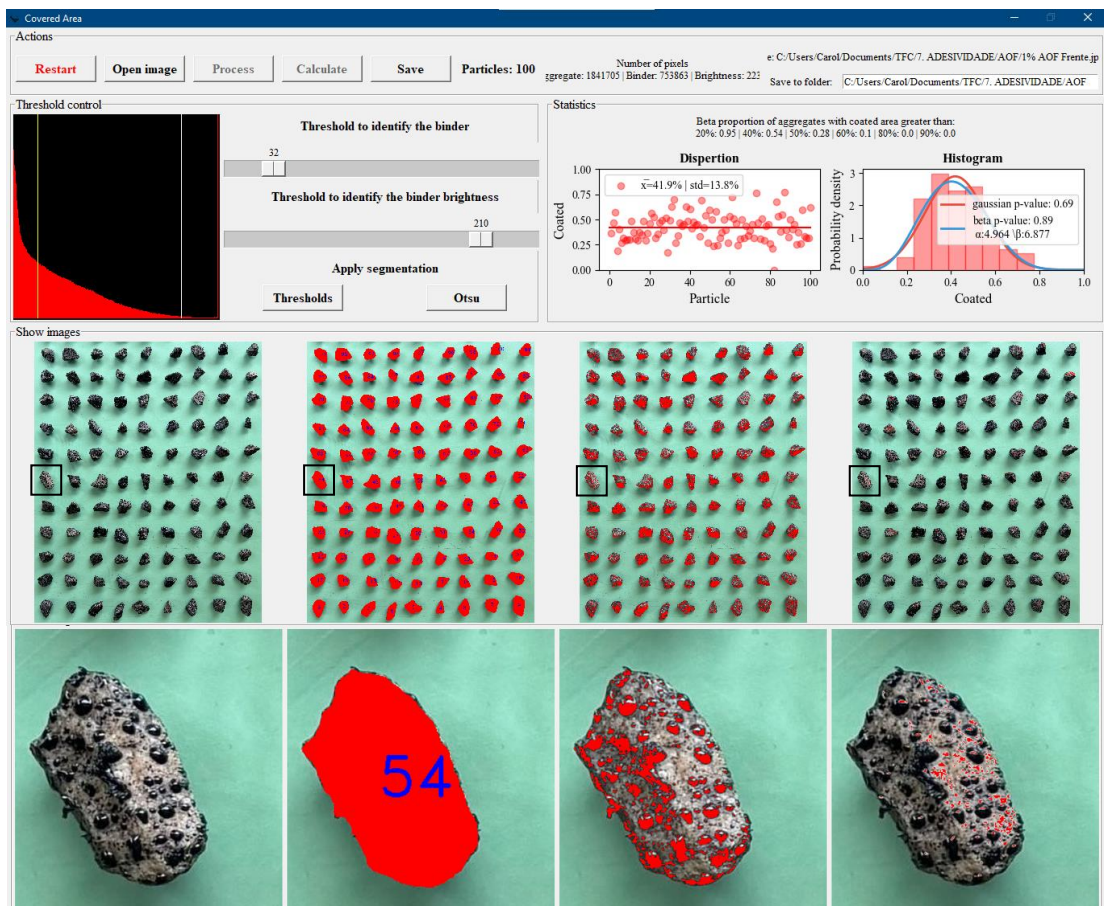
O Processamento Digital de Imagens (DIP) para contagem de pixels de agregado e ligante, citado por Lucas Júnior, (2018), foi realizado para quantificar numericamente os resultados do teste de adesão tradicional e comparar os resultados com as avaliações visuais.

O programa utilizado para este procedimento utiliza o método de segmentação de limiar para atribuir fichário e pixels agregados, no qual o primeiro limiar distingue tons de cinza escuro (ligante) de tons de cinza claro (agregado + brilho do ligante), e o segundo separa tons de cinza médio a escuro (agregado + ligante) dos brancos (brilho do ligante). Com a contagem de pixels determinada, o programa calcula a porcentagem de área coberta para cada partícula através da Equação 3 (Gomes *et al.*, 2024).

$$\text{Área coberta (\%)} = 100 * \frac{(\text{pixels do ligante}) + (\text{pixels do brilho do ligante})}{\text{pixels do agregado}} \quad (3)$$

A interface do programa é mostrada na Figura 8.

Figura 8 – Interface do programa utilizado para o DIP (aplicado à amostra com LA+1% AOF)



Fonte: Elaborada pela autora.

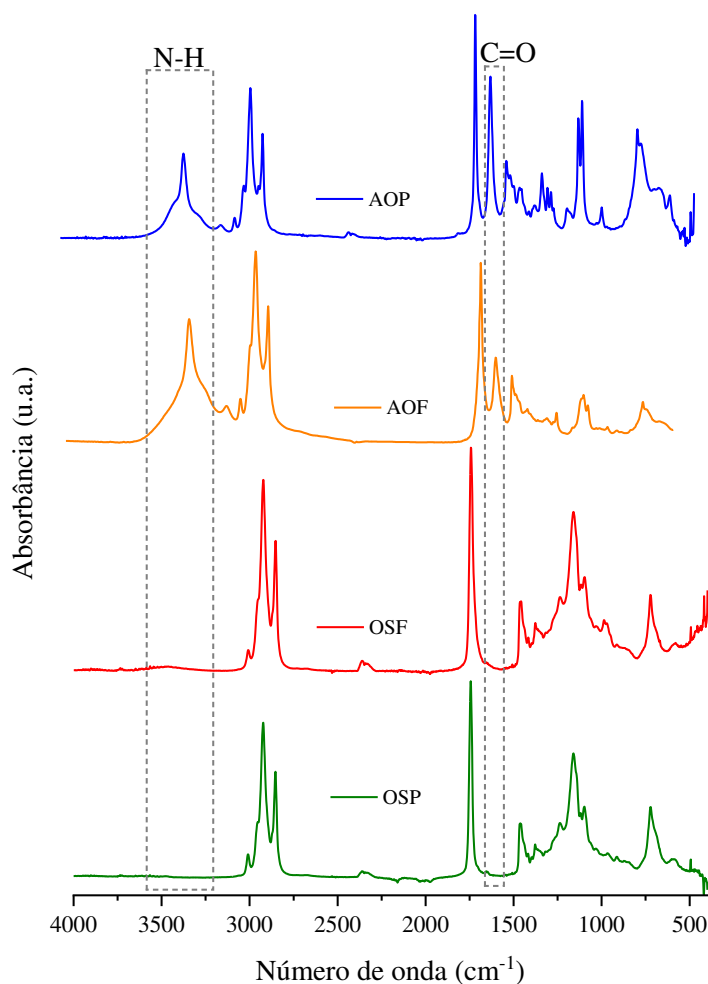
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das amidas

5.1.1 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A Figura 9 apresenta os espectros de infravermelho (FTIR) das amidas obtidas a partir dos óleos de soja puro (OSP) e de fritura (OSF), designadas como AOP (amida de óleo puro) e AOF (amida de óleo de fritura), respectivamente, juntamente com os espectros de seus óleos precursores.

Figura 9 – Espectros de FTIR para AOP, AOF, OSP e OSF



Fonte: Elaborada pela autora.

Nos espectros das amidas (AOP e AOF), destaca-se a formação de bandas na região de $3300\text{-}3200\text{ cm}^{-1}$, atribuídas ao estiramento do grupo N-H das amidas, confirmando a

formação das amidas (Pavia *et al.*, 2010).

A transformação da carboxila dos ácidos graxos presentes nos óleos em ligação amídica é confirmada também pela presença de bandas de estiramento do grupo C=O característico das amidas, localizadas entre 1650-1600 cm^{-1} e de bandas de dobramento em aproximadamente 1550 cm^{-1} , as quais são atribuídas a uma combinação de uma banda de estiramento C-N com uma banda de dobramento N-H (Pavia *et al.*, 2010).

Além disso, observa-se bandas de estiramento C-N entre 1350-1250 cm^{-1} no espectro das amidas, reforçando a presença do grupo amídico (Pavia *et al.*, 2010). Essas bandas estão ausentes nos espectros dos óleos (OSP e OSF), evidenciando que a reação de amidação foi bem-sucedida ao modificar a estrutura química dos óleos precursores.

Os espectros dos óleos precursores (OSP e OSF) exibem bandas características dos triglicerídeos, como o estiramento C=O dos ésteres em 1740 cm^{-1} e bandas associadas ao estiramento C-H de cadeias alifáticas nos intervalos de 3000-2800 cm^{-1} . Essas bandas são diminuídas nos espectros das amidas (AOP e AOF), indicando a conversão dos triglicerídeos em estruturas amídicas (Pavia *et al.*, 2010).

Os espectros das amidas AOP e AOF apresentam padrões semelhantes, o que sugere que a origem do óleo (puro ou de fritura) não afeta significativamente a formação do grupo amídico. No entanto, pequenas variações na intensidade das bandas podem ser atribuídas à presença de compostos oxidados nos óleos de fritura, que podem ter interagido durante a reação de amidação. Isso é corroborado pela ligeira diferença nas bandas de C=O e N-H, indicando a possível presença de subprodutos ou modificações na composição química da AOF em relação à AOP (Clayden *et al.*, 2012).

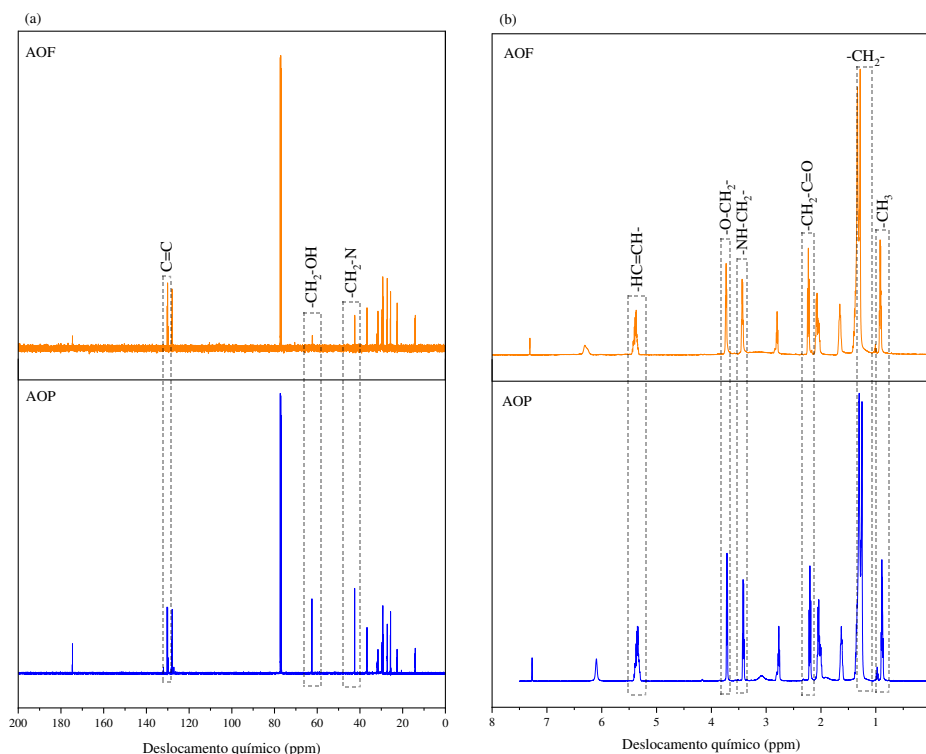
A caracterização por FTIR evidencia que as amidas sintetizadas possuem grupos funcionais que podem interagir com o ligante asfáltico, promovendo modificações químicas significativas. As ligações amídicas (N-H, C=O e C-N) têm o potencial de melhorar a adesão entre o ligante asfáltico e os agregados, além de influenciar propriedades como estabilidade térmica e resistência à oxidação (Senior-Arrieta *et al.*, 2017). Esses resultados reforçam o uso de amidas como aditivos funcionais e sustentáveis, aproveitando resíduos como o óleo de fritura para a melhoria das propriedades de pavimentos asfálticos.

5.1.2 Ressonância magnética nuclear de ^1H e de ^{13}C (RMN)

As estruturas dos aditivos AOF e AOP foram confirmadas através da espectroscopia por RMN de ^1H e ^{13}C , permitindo identificar grupos funcionais e o ambiente químico em

detalhes. A Figura 10a apresenta os espectros de ^{13}C , enquanto a Figura 10b exibe os espectros de ^1H , fornecendo informações complementares para a caracterização das amidas.

Figura 10 – Espectros de RMN de ^{13}C para AOF e AOP (a) e espectros de RMN de ^1H para AOF e AOP (b)



Fonte: Elaborada pela autora.

No espectro de ^1H (Figura 10b), a reação de amidificação foi confirmada pelos sinais entre 3,40 ppm ($-\text{NH}-\text{CH}_2-$) e 3,72 ppm ($-\text{O}-\text{CH}_2-$), indicando incorporação do grupo amino proveniente da etanolamina na estrutura do composto (Ferreira *et al.*, 2024). Em 0,86 ppm, tem-se um tripleto atribuído ao grupo metil terminal ($-\text{CH}_3$) de cadeias alifáticas. Esse sinal, combinado ao singlete em 1,30 ppm, indica a presença de grupos metileno ($-\text{CH}_2-$) em cadeias longas e saturadas.

Outro sinal relevante foi o tripleto em 2,20 ppm, associado ao grupo $-\text{CH}_2-\text{C}=\text{O}$, caracterizando metilenos diretamente ligados a carbonilas (Uchoa *et al.*, 2021). Além disso, um multipletto entre 5,30 e 5,41 ppm evidencia a presença dos hidrogênios ligados a carbonos insaturados ($-\text{HC}=\text{CH}-$), confirmando a presença de insaturações nos compostos (Ferreira *et al.*, 2024).

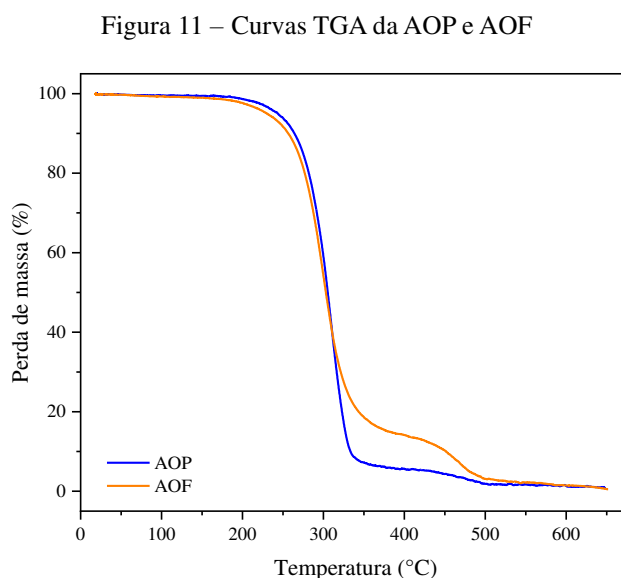
O espectro de ^{13}C , mostrado na Figura 10a, complementa essas observações, apresentando sinais característicos das estruturas das amidas. O sinal em 42,48 ppm está associado ao carbono amídico ($-\text{CH}_2-\text{N}$), enquanto o deslocamento em 62,50 ppm é atribuído

ao carbono do grupo álcool primário terminal ($-\text{CH}_2\text{-OH}$). Ambos confirmam a formação dos grupos funcionais esperados durante a síntese. Ademais, a presença de uma ligação dupla em ambos os aditivos pode ser verificada pelo sinal em 130,26 ppm, característico de ligações duplas de alkenos ($\text{C}=\text{C}$).

A análise conjunta dos espectros de ^1H e ^{13}C confirma a presença de cadeias alifáticas saturadas, segmentos insaturados e grupos funcionais específicos, como carbonilas, aminas e álcoois. Essas características estruturais influenciam diretamente as propriedades físico-químicas dos compostos. Além disso, os resultados validam a eficiência do processo de síntese e a formação das amidas AOF e AOP.

5.1.3 Análise Termogravimétrica (TGA)

Na Figura 11 são apresentadas as curvas termogravimétricas para as amostras AOP e AOF, respectivamente. Ambas as amostras exibiram perfis de degradação térmica semelhantes, indicando que possuem propriedades térmicas comparáveis, embora algumas diferenças sutis possam ser observadas. Observou-se que as amostras apresentam uma perda de massa inicial não muito significativa desde a temperatura mais baixa até aproximadamente 200 °C. Essa baixa perda de massa nessa faixa demonstra a estabilidade térmica inicial dos compostos.



Fonte: Elaborada pela autora.

A partir das curvas de TGA, é possível observar eventos térmicos característicos

relacionados à decomposição das amidas. Esses eventos podem ser analisados com maior precisão utilizando as curvas derivadas de perda de massa (DTG), que destacam as temperaturas correspondentes às taxas máximas de decomposição, mostradas na Tabela 2.

No caso das amidas analisadas, as curvas TGA mostram três eventos térmicos principais. O primeiro evento é geralmente associado à perda de massa por evaporação de água residual ou solventes presentes nas amostras. Esse comportamento pode ser atribuído à liberação de moléculas voláteis, um fenômeno comum em materiais orgânicos.

Tabela 2 – Dados obtidos a partir das curvas DTG da AOP e da AOF

Amostra	Evento	Intervalo de temperatura (°C)	Temperatura de degradação (°C)	Perda de massa (%)
AOP	1°	38 - 265	235	12,9
	2°	265 - 379	325	71,8
	3°	379 - 539	454	12,7
Resíduo				2,6
Amostra	Evento	Intervalo de temperatura (°C)	Temperatura de degradação (°C)	Perda de massa (%)
AOF	1°	38 - 244	222	6,8
	2°	244 - 358	302	75,7
	3°	358 - 530	480	14,9
Resíduo				2,6

Fonte: Elaborada pela autora.

O segundo evento representa a etapa mais significativa de perda de massa e ocorre aproximadamente entre 244 °C e 358 °C, com uma queda acentuada na curva. Essa etapa está associada à decomposição térmica das cadeias alifáticas e dos grupos funcionais presentes nas amidas. A temperatura de degradação deste evento foi de 325 °C para a AOP e de 302 °C para AOF, enquanto as perdas de massa foram acima de 70% para ambas as amidas. As diferenças nas temperaturas de pico podem ser atribuídas às distintas composições químicas dos óleos utilizados na síntese das amidas. A temperatura de início da degradação parece ser ligeiramente diferente para as amostras AOF e AOP, sugerindo que a amida derivada do óleo de fritura pode conter componentes adicionais (possivelmente produtos de oxidação ou compostos residuais do processo de fritura) que influenciam sua estabilidade térmica.

Por fim, um terceiro evento de degradação térmica, observado em temperaturas acima de 380 °C, está relacionado à decomposição completa da matriz orgânica restante e à

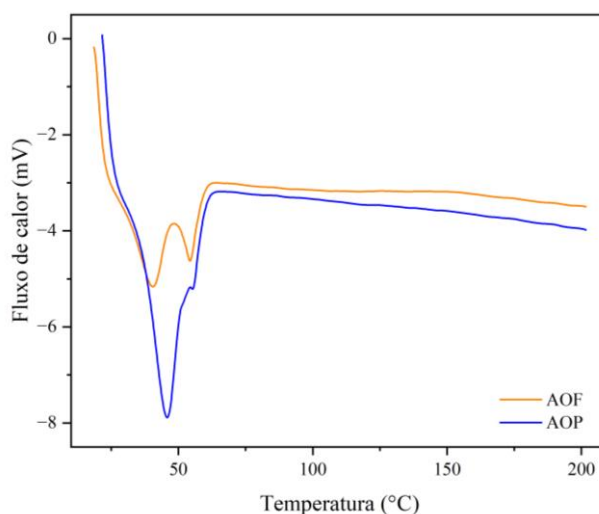
formação de resíduos carbonáceos. Esse comportamento evidencia a boa estabilidade térmica dos aditivos, já que os principais processos de decomposição ocorrem em faixas de temperatura elevadas. Em temperaturas acima de 500 °C, observa-se uma estabilização da perda de massa, com ambas as amostras apresentando uma quantidade semelhante de resíduo final. Esse resíduo pode estar associado a materiais inorgânicos ou carbono residual não volatilizado.

Com base nos resultados da análise termogravimétrica (TGA), ambos os aditivos (AOF e AOP) apresentam estabilidade térmica adequada para uso como modificadores de ligantes asfálticos, suportando as temperaturas típicas de produção e operação, que não excedem 200 °C. A AOP, derivada de óleo virgem, mostrou maior estabilidade térmica, sendo mais indicada para aplicações em condições extremas. Já a AOF, obtida de óleo de fritura, destaca-se como uma alternativa sustentável, proporcionando reaproveitamento de resíduos sem comprometer significativamente o desempenho térmico. Assim, ambas podem contribuir para melhorar a durabilidade e as propriedades do ligante. O efeito da decomposição térmica é importante pois a mistura asfáltica é produzida sob as altas temperaturas dos processos de usinagem e compactação.

5.1.4 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A análise de DSC (Figura 12) fornece informações sobre as transições térmicas das amidas derivadas de óleos de fritura e virgem, que são relevantes para avaliar suas propriedades térmicas em aplicações, como modificadores de ligantes asfálticos. A partir da Figura 10 foi possível observar comportamentos térmicos distintos entre a AOP e a AOF, indicando picos endotérmicos, por volta de 40 a 60 °C, associados à fusão dos cristais das amidas (Uchoa *et al.*, 2021). Esses picos foram observados em temperaturas distintas para cada amida, evidenciando as diferenças nas estruturas cristalinas e no grau de organização molecular.

Figura 12 – Curvas DSC da AOP e AOF



Fonte: Elaborada pela autora.

A amida derivada do óleo puro (AOP) apresentou uma temperatura de fusão de 45 °C, enquanto a temperatura de fusão da amida derivada do óleo de fritura (AOF) foi de 40 °C. Esse resultado está relacionado à maior pureza e regularidade estrutural da amida sintetizada a partir do óleo de soja puro, que favorece uma organização cristalina mais estável e, conseqüentemente, maior temperatura de fusão. Em contrapartida, a amida derivada do óleo de fritura, devido à presença de compostos oxigenados e outras alterações estruturais oriundas do processo de reutilização do óleo, apresentou menor temperatura de fusão, sugerindo uma menor regularidade na organização molecular.

As curvas DSC também evidenciam a presença de eventos endotérmicos secundários em temperaturas mais elevadas, relacionados à transição de fases ou rearranjos estruturais das amidas (Merkel *et al.*, 2020). Esses eventos podem ser indicativos de modificações na estabilidade térmica e na interação molecular, especialmente nas amidas derivadas do óleo de fritura, onde a maior complexidade química influencia significativamente as propriedades térmicas.

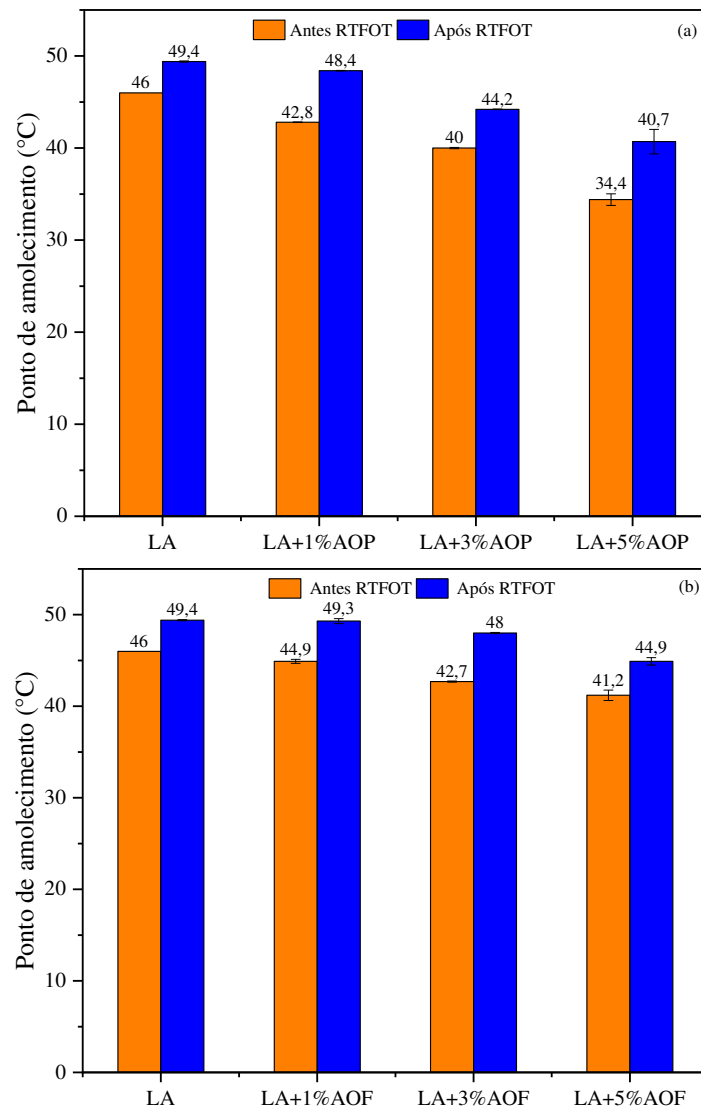
A análise de DSC confirma que tanto AOF quanto AOP possuem propriedades térmicas adequadas para uso como aditivos em ligantes asfálticos, com transições relevantes na faixa de temperatura operacional. A diferença entre os materiais, com AOF apresentando maior heterogeneidade, destaca a necessidade de ajustes específicos dependendo da aplicação. O AOF é vantajoso do ponto de vista da sustentabilidade, enquanto o AOP pode apresentar maior uniformidade no desempenho térmico.

5.2 Caracterização dos ligantes asfálticos

5.2.1 Ensaio de Ponto de Amolecimento (PA)

A Figura 13 apresenta os resultados do ensaio de ponto de amolecimento para o ligante asfáltico puro e para o ligante modificado com amidas em diferentes concentrações, nas condições antes e após o envelhecimento a curto prazo. De forma geral, os resultados indicam uma redução na temperatura de amolecimento do ligante asfáltico após a modificação, sugerindo uma maior fluidez do material, assim como Uchoa *et al.*, (2021) demonstraram.

Figura 13 – Resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento



Fonte: Elaborada pela autora.

Essa redução pode ser atribuída à estrutura química das amidas, que contêm

grupos funcionais como aminas e cadeias de ácidos graxos. Esses elementos contribuem para a diminuição das forças de coesão entre as moléculas do ligante, reduzindo sua resistência térmica. Como consequência, a temperatura necessária para que o material transite de um estado sólido para um estado mais fluido também diminui.

Entretanto, observa-se que os valores para o ligante asfáltico modificado com a amida derivada do óleo de soja de fritura (LA+AOF, Figura 13b) é superior ao do ligante modificado com a amida derivada do óleo de soja puro (LA+AOP, Figura 13a). Esse comportamento pode ser atribuído às alterações no perfil de ácidos graxos do óleo durante o processo de fritura e aquecimento, que convertem ácidos graxos poli-insaturados e insaturados em ácidos graxos saturados e monoinsaturados (Omojola *et al.*, 2019). Essas mudanças químicas podem influenciar as propriedades térmicas e reológicas do ligante, aumentando a resistência ao amolecimento.

Observou-se que o aumento na proporção de AOF levou a uma tendência de redução progressiva no ponto de amolecimento. Por exemplo, a adição de 1% de AOF reduziu o ponto de amolecimento em 1,1 °C antes do envelhecimento e apresentou uma redução menos significativa após o envelhecimento. Para a proporção de 3%, as reduções foram mais expressivas, cerca de 3,3 °C antes do envelhecimento e 1,4 °C após o envelhecimento (RTFOT). Com 5% de AOF, observou-se uma redução ainda maior antes do RTFOT, de cerca de 4,8 °C, enquanto a redução após o RTFOT foi menos acentuada (1,1 °C). Esses dados sugerem que, embora todas as concentrações demonstrem impacto no ponto de amolecimento, as proporções de 1% e 3% de AOF apresentam maior estabilidade térmica, enquanto a modificação com 5% pode ser mais sensível a temperaturas elevadas e ao processo de envelhecimento.

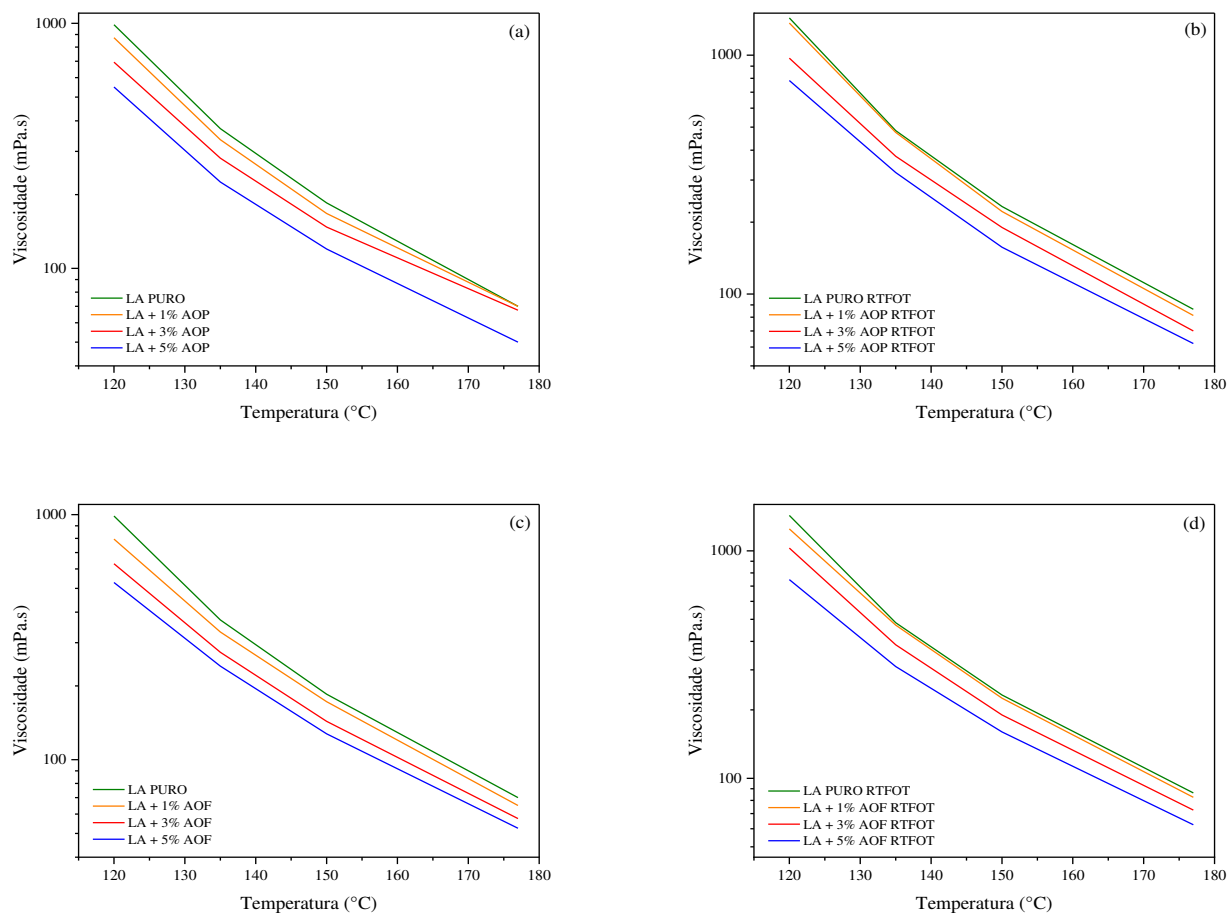
Dessa forma, o estudo evidencia a influência significativa das concentrações de AOF no comportamento térmico e mecânico do ligante asfáltico, reforçando a necessidade de ajustes específicos para atender às condições climáticas e às exigências de desempenho de cada aplicação.

5.2.2 Ensaio de Viscosidade Rotacional

A Figura 14 apresenta os resultados do ensaio de viscosidade rotacional para ligantes asfálticos puros e modificados, antes e após o envelhecimento a curto prazo, analisados em quatro temperaturas distintas: 120 °C, 135 °C, 150 °C e 177 °C. Os resultados indicam que a viscosidade dos ligantes diminui à medida que a temperatura aumenta,

comportamento esperado devido à redução da resistência ao fluxo em temperaturas mais elevadas.

Figura 14 – Resultados de viscosidade rotacional dos ligantes puro e modificados, antes e após o envelhecimento a curto prazo, em diferentes temperaturas



Fonte: Elaborada pela autora.

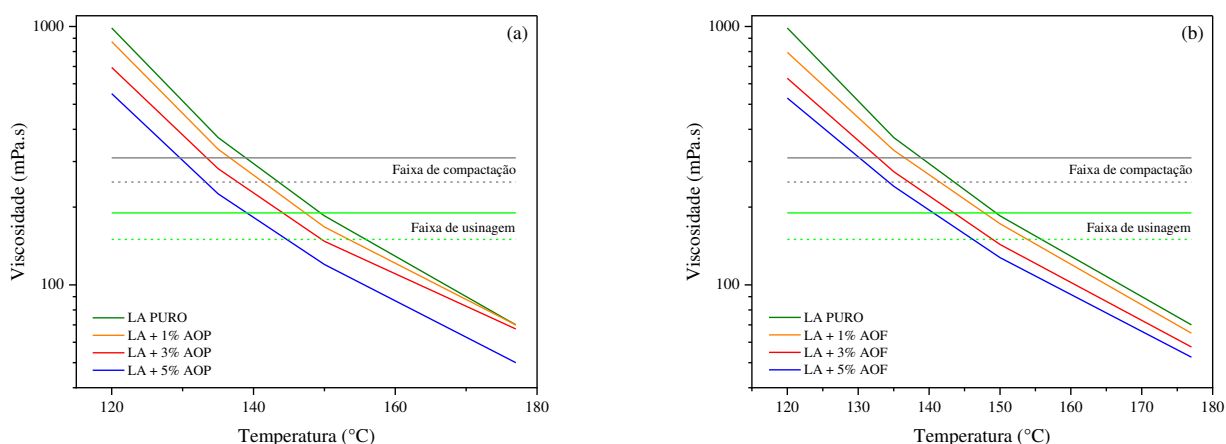
Além disso, constatou-se que a viscosidade diminui com o aumento da proporção das amidas no ligante, antes e após RTFOT. Proporções mais elevadas de AOF resultaram em maiores reduções na viscosidade, demonstrando que a quantidade de amida adicionada influencia diretamente as propriedades reológicas do material (Figura 14c). Por exemplo, a adição de 1% de AOF promoveu uma leve diminuição na viscosidade, enquanto proporções de 3% apresentaram um bom resultado, proporcionando maior fluidez e redução das temperaturas. Por outro lado, a concentração de 5% resultou em reduções mais acentuadas na viscosidade e nas temperaturas. No entanto, em condições de altas temperaturas, isso pode comprometer a estabilidade térmica, favorecendo a deformação permanente, acelerando a oxidação e reduzindo a aderência aos agregados. Esses resultados sugerem que a modificação

reológica é diretamente dependente da proporção de AOF, com impactos mais expressivos em concentrações elevadas.

Por meio do desse ensaio, foi possível determinar as Temperaturas de Usinagem e Compactação (TUCs) dos ligantes modificados com as diferentes proporções de aditivo. A temperatura de usinagem corresponde à faixa em que a viscosidade do ligante está entre 0,17 e 0,28 Pa·s. Nesse intervalo, o material apresenta fluidez suficiente para envolver os agregados uniformemente durante a mistura na usina. Já a temperatura de compactação está associada ao intervalo em que a viscosidade varia entre 0,28 e 0,36 Pa·s, garantindo que o ligante mantenha fluidez adequada para permitir a compactação eficiente da mistura asfáltica e a obtenção de uma densidade ideal (Domingos *et al.*, 2012; Geng *et al.*, 2016).

A Figura 15 ilustra a relação entre viscosidade e temperatura, evidenciando as temperaturas correspondentes aos limites de viscosidade e destacando que a redução de viscosidade gerada pelo uso de AOF impactou diretamente na diminuição das TUCs para todas as concentrações avaliadas.

Figura 15 – Curvas para cálculo das TUCs



Fonte: Elaborada pela autora.

As Tabelas 3 e 4 apresentam os dados referentes às temperaturas de usinagem e compactação dos ligantes modificados com AOP e AOF, respectivamente. De forma geral, a adição de amidas promove uma redução nas temperaturas médias necessárias para ambas as etapas, indicando potencial para economia de energia e menor impacto ambiental durante o processo de pavimentação. A inclusão de AOP e AOF levou a uma redução progressiva nas temperaturas médias de usinagem e compactação com o aumento da concentração de amida.

Tabela 3 – Faixa de temperatura de usinagem e compactação para a AOP

Amostras	Temperatura (°C)			Faixa de Compactação	Média de Compactação	Redução da T de Compactação
	Faixa de Usinagem	Média de Usinagem	Redução da T de Usinagem			
LA	149 - 158	153,5	-	140 - 145	142,5	-
LA + 1% AOP	148 - 155	151,5	2	137 - 142	139,5	3
LA + 3% AOP	145 - 150	147,5	6	134 - 138	136	6,5
LA + 5% AOP	140 - 145	142,5	11	131 - 133	132	10,5

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 4 – Faixa de temperatura de usinagem e compactação para a AOF

Amostras	Temperatura (°C)			Faixa de Compactação	Média de Compactação	Redução da T de Compactação
	Faixa de Usinagem	Média de Usinagem	Redução da T de Usinagem			
LA	149 - 158	153,5	-	140 - 144	142	-
LA + 1% AOF	148 - 155	151,5	2	137 - 142	139,5	2,5
LA + 3% AOF	144 - 149	146,5	7	133 - 137	135	7
LA + 5% AOF	141 - 147	144	9,5	131 - 134	132,5	9,5

Fonte: Elaborada pela autora.

Para 5% de AOF, a temperatura média de usinagem e de compactação foi reduzida em 9,5 °C em relação ao ligante puro. Esses dados demonstram que a AOP apresenta maior impacto na redução das temperaturas, especialmente na usinagem, enquanto a AOF apresenta desempenho semelhante, mas com reduções menos acentuadas em concentrações mais altas. Esses resultados corroboram estudos na literatura que destacam o efeito plastificante de compostos orgânicos em ligantes asfálticos, reduzindo a viscosidade e, consequentemente, as temperaturas de manuseio (Branthaver, *et al.*, 1993; Airey, 2003).

A maior eficiência da AOP na redução das temperaturas de usinagem e compactação pode ser atribuída à sua composição química mais homogênea, devido à ausência de compostos oxidados ou de produtos de degradação presentes no óleo de fritura. A AOF, por outro lado, pode conter componentes resultantes do processo de fritura que influenciam sua interação com a matriz asfáltica, levando a um efeito plastificante ligeiramente menor em concentrações elevadas. A literatura sugere que óleos vegetais oxidados ou processados podem melhorar a dispersão e a compatibilidade com os ligantes asfálticos, promovendo uma maior redução de viscosidade (Yang, *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2018).

Os resultados mostraram que ambas as amidas são viáveis para modificação de ligantes asfálticos, mas o desempenho da AOP em temperaturas mais altas sugere que ela pode ser mais adequada para aplicações onde a estabilidade térmica é importante. Por outro lado, a AOF é uma alternativa sustentável com impacto positivo no custo e no meio ambiente,

mesmo com desempenho levemente inferior em concentrações elevadas.

5.2.3 Ensaios Reológicos em Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR)

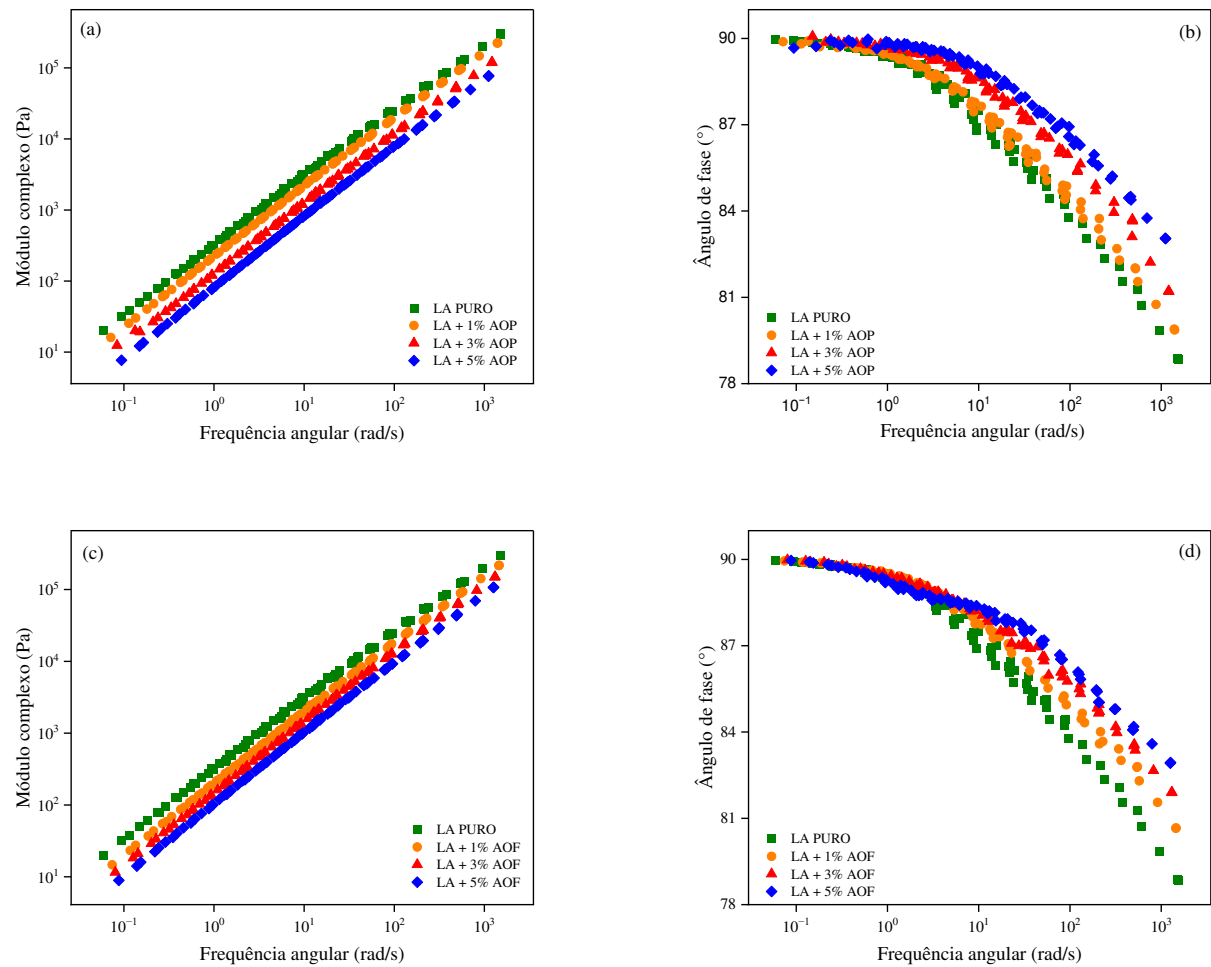
A análise das propriedades reológicas dos ligantes asfálticos foi realizada através do módulo complexo ($|G^*|$) e do ângulo de fase (δ), obtidos nos ensaios de varredura de frequência e varredura de temperatura utilizando um Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR). O módulo complexo ($|G^*|$) reflete a rigidez do ligante asfáltico, enquanto o ângulo de fase (δ) indica o comportamento viscoelástico, sendo a relação entre as respostas elástica e viscosa do material.

5.2.3.1 Análise das propriedades dos ligantes asfálticos através do módulo complexo ($|G^|$) e do ângulo de fase (δ) obtidos no ensaio de varredura de frequência*

A Figura 16a-d apresenta as curvas mestras do módulo complexo $|G^*|$ e do ângulo de fase (δ) para o ligante puro e os ligantes modificados com as amidas AOP e AOF. É possível observar que os ligantes modificados exibiram valores de $|G^*|$ menores em comparação ao ligante puro em toda a faixa de frequências analisada. Essa redução nos valores de $|G^*|$ é proporcional ao aumento da concentração das amidas, indicando que os ligantes modificados se tornam progressivamente menos rígidos à medida que a proporção de aditivo aumenta.

Em baixas frequências (condições de altas temperaturas), os valores reduzidos de $|G^*|$ para o ligante modificado com AOF destacam uma menor rigidez do material, indicando maior capacidade de deformação sob essas condições. Em altas frequências (condições de baixas temperaturas), os valores de $|G^*|$ dos ligantes modificados também permanecem inferiores aos do ligante puro, sugerindo que a redução na rigidez é um comportamento generalizado dos ligantes modificados, o que pode ser benéfico para reduzir a ocorrência de trincas por baixa temperatura, mas pode indicar menor resistência ao carregamento dinâmico em pavimentos sujeitos a tráfego pesado.

Figura 16 – Curvas mestras do módulo complexo $|G^*|$ (a, c) e ângulo de fase (δ) (b, d) em função da frequência angular (rad/s) para as amostras não envelhecidas de AOP (a, b) e AOF (c, d)



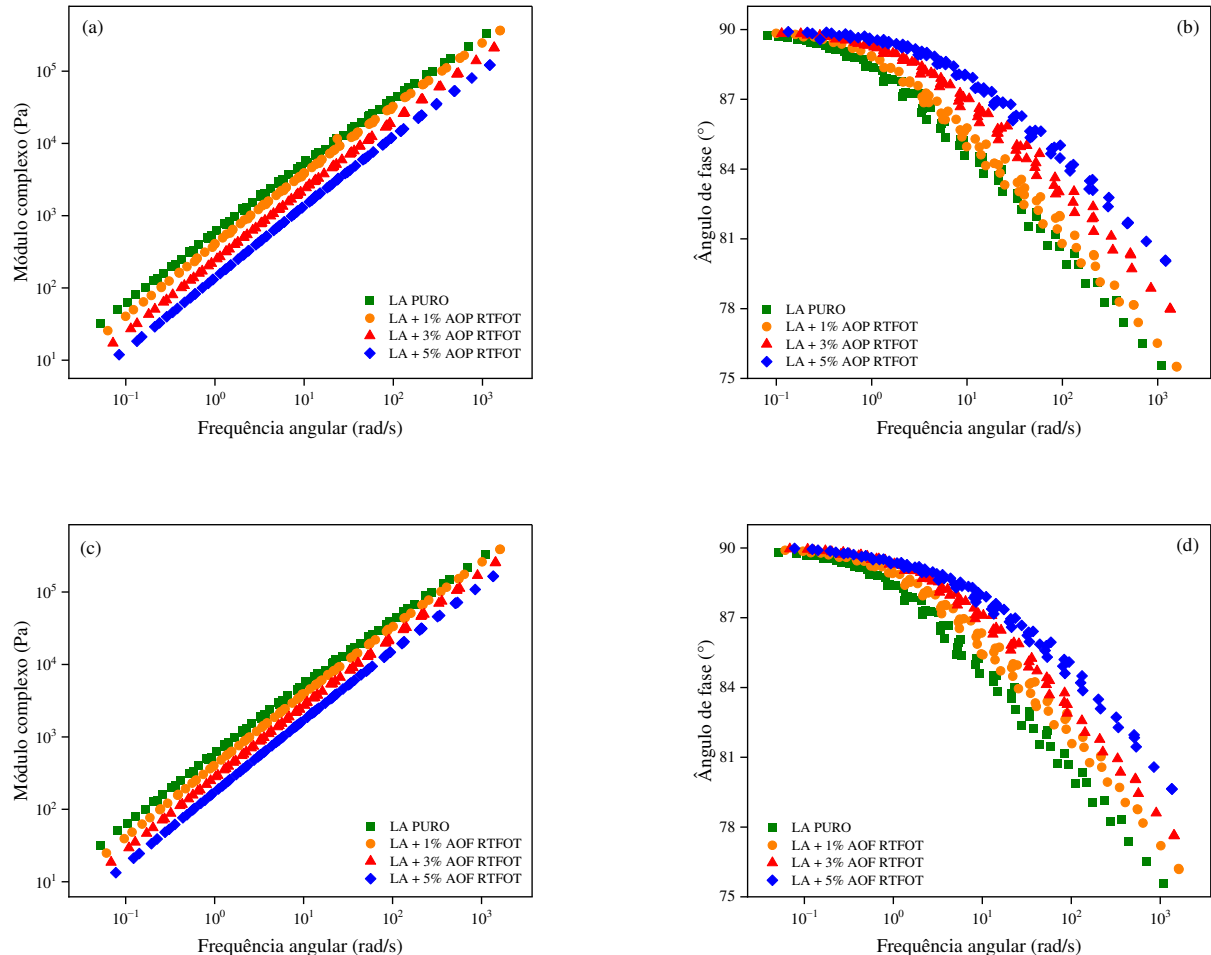
Fonte: Elaborada pela autora.

A análise do ângulo de fase (δ), apresentada nas Figuras 16b e 16d, complementa esses resultados. Em baixas frequências (altas temperaturas), ambos os aditivos (AOP e AOF) exibem valores de δ superiores aos do ligante puro, indicando um comportamento mais viscoso e uma menor resposta elástica. Esse comportamento está de acordo com a redução do módulo complexo ($|G^*|$), evidenciando a maior flexibilidade do material. Já em altas frequências (baixas temperaturas), os valores de δ também permanecem elevados para os ligantes modificados.

Os resultados indicam que as amidas, tanto de AOP quanto de AOF, modificam o comportamento reológico dos ligantes, tornando-os mais flexíveis e menos rígidos em uma ampla faixa de frequências (temperaturas). Esse comportamento pode ser vantajoso para pavimentos em regiões sujeitas a grandes variações térmicas, onde a redução de trincas térmicas é essencial. No entanto, a menor elasticidade pode afetar negativamente a resistência

à deformação permanente, especialmente sob tráfego intenso e contínuo, e deve ser considerada no projeto de misturas asfálticas.

Figura 17 – Curvas mestras do módulo complexo $|G^*|$ (a, c) e ângulo de fase (δ) (b, d) em função da frequência angular (rad/s) para as amostras envelhecidas de AOP (a, b) e AOF (c, d)



Fonte: Elaborada pela autora.

Nos ligantes envelhecidos a curto prazo, os valores de $|G^*|$ aumentam em todos os casos devido ao envelhecimento como mostrado na Figura 17a-c. Esse comportamento é esperado, pois o envelhecimento oxidativo promove o aumento da rigidez do ligante devido à formação de ligações cruzadas e reações químicas nos componentes do material.

Contudo, o módulo complexo do ligante modificado com AOF é ligeiramente inferior ao de AOP após o envelhecimento, sugerindo que a amida do óleo de fritura reduz um pouco mais a rigidez do ligante envelhecido em comparação à amida do óleo puro. Essa diferença pode ser associada às características químicas distintas dos dois modificadores, como a presença de compostos oxigenados e resíduos no óleo de fritura.

Os valores de δ , apresentados nas Figuras 17b e 17d, mostram que as amostras modificadas com amidas apresentam valores de δ maiores que os do ligante puro em toda a faixa de frequências, mesmo após o envelhecimento. Isso indica que as amidas promovem um comportamento mais viscoso e menos elástico, o que está relacionado à capacidade de dissipação de energia sob carregamento dinâmico.

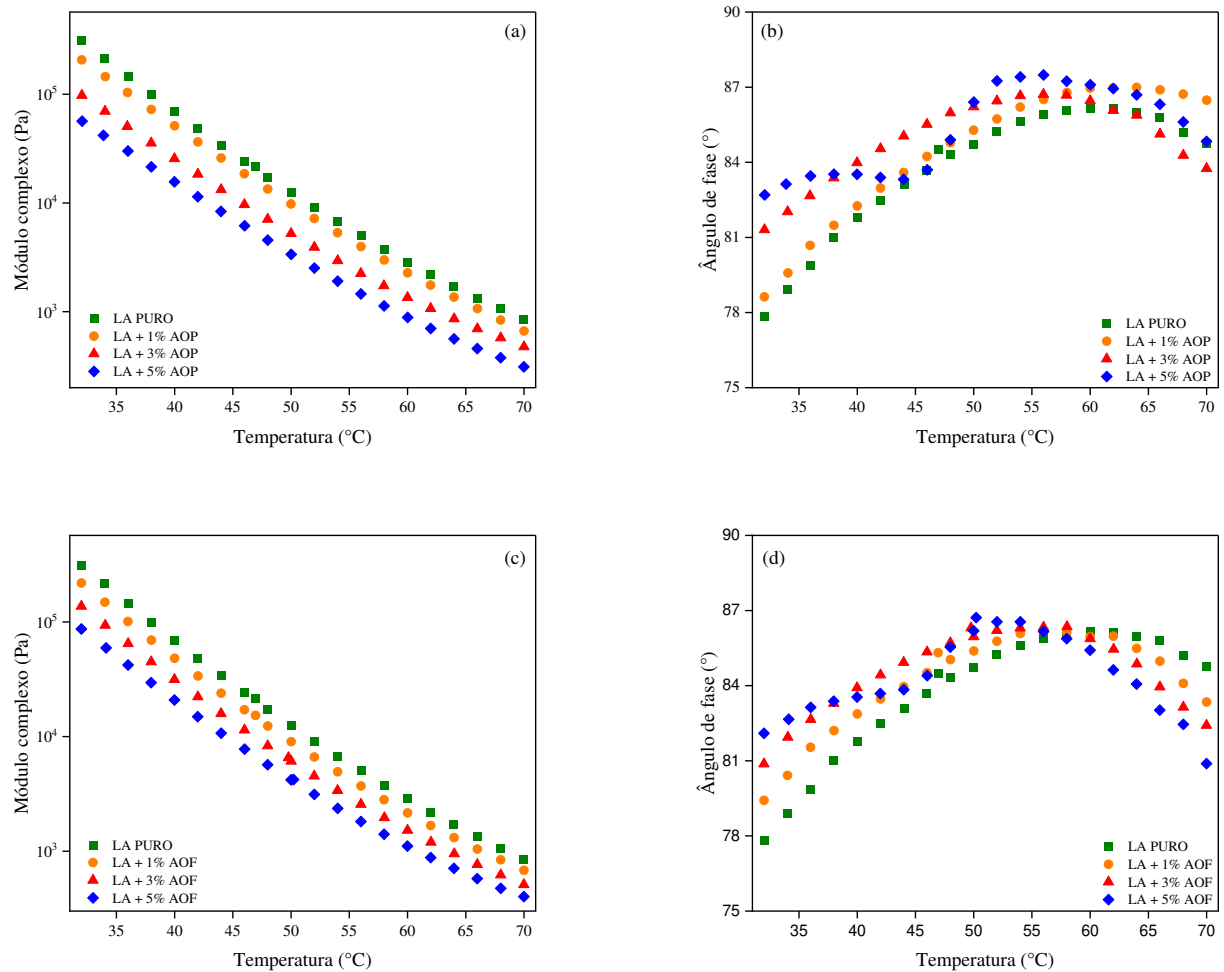
Nesse sentido, pode-se concluir que a AOP promove uma maior retenção de δ após o envelhecimento, indicando que a modificação com óleo puro resulta em um comportamento viscoso mais estável mesmo após a oxidação. Isso reflete a composição química homogênea e menos suscetível à degradação do óleo puro. Embora também promova um aumento na viscosidade relativa (valores elevados de δ), a AOF apresenta maior sensibilidade ao envelhecimento, possivelmente devido à presença de compostos oxidados ou produtos residuais oriundos do processo de fritura.

De modo geral, os resultados sugerem que as amidas se destacam por sua eficiência na redução da rigidez e na melhoria do comportamento viscoso do ligante asfáltico, mesmo considerando as condições de envelhecimento. Essas características tornam a AOF uma opção interessante para a modificação de ligantes asfálticos, especialmente em aplicações que demandam maior flexibilidade e resistência a trincas térmicas. No entanto, a redução de $|G^*|$ e o aumento de δ observados para o ligante com AOF apontam para um possível comprometimento na resistência à deformação permanente em climas quentes, o que deve ser analisado cuidadosamente para garantir o desempenho adequado do pavimento.

5.2.3.2 Análise das propriedades dos ligantes asfálticos através do módulo complexo ($|G^|$) e do ângulo de fase (δ) obtidos no ensaio de varredura de temperatura*

A Figura 18 analisa o comportamento reológico dos ligantes asfálticos não envelhecidos modificados com as amidas (AOP e AOF), com base nos parâmetros do módulo complexo ($|G^*|$) e do ângulo de fase (δ) em função da temperatura.

Figura 18 – Curvas mestras do módulo complexo $|G^*|$ (a, c) e ângulo de fase (δ) (b, d) em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para as amostras não envelhecidas de AOP (a, b) e AOF (c, d)

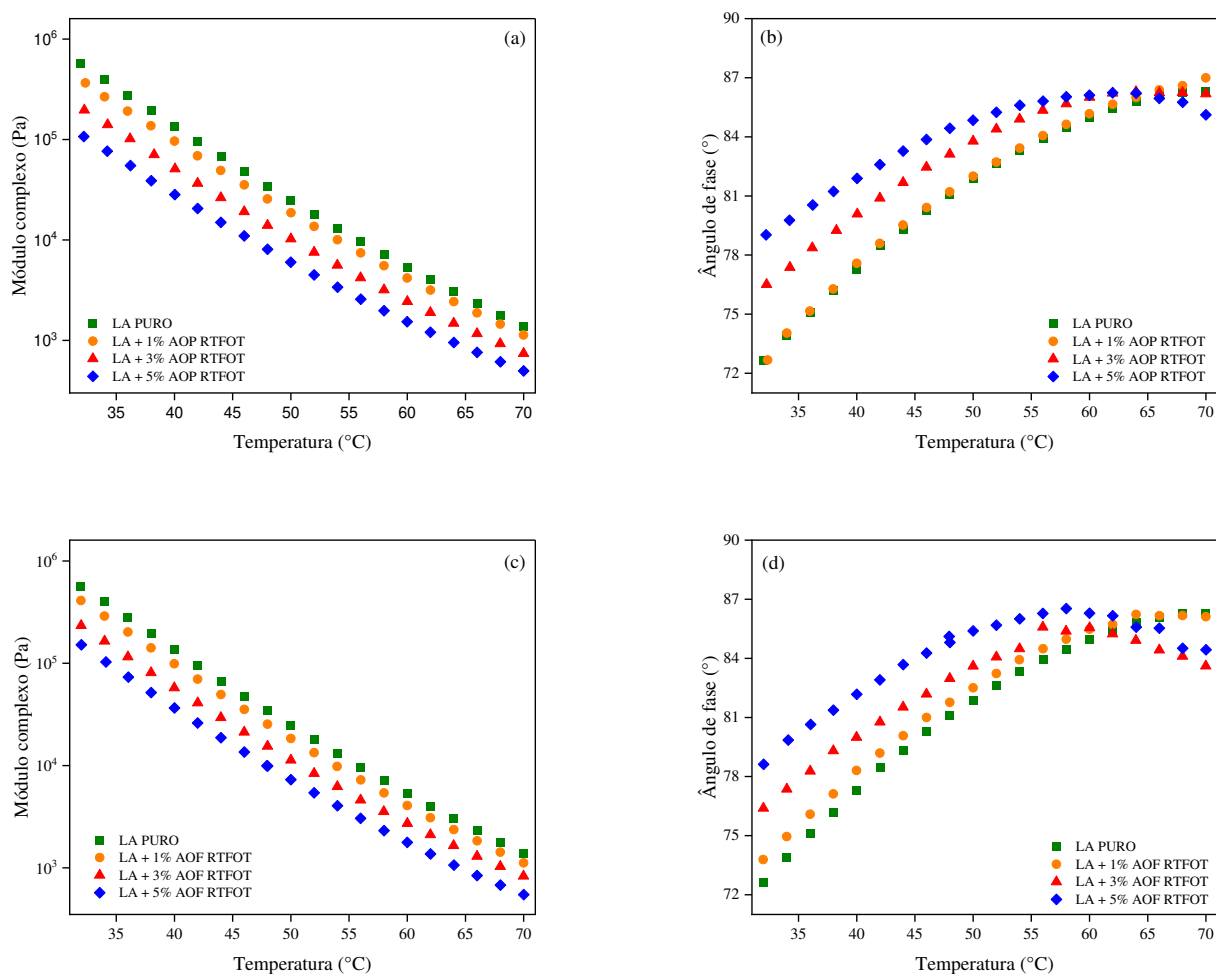


Fonte: Elaborada pela autora.

As Figuras 18a e 18c mostram que os valores de $|G^*|$ dos ligantes modificados com AOP e AOF são inferiores ao do ligante puro ao longo de toda a faixa de temperatura analisada. Essa redução no módulo complexo reflete uma menor rigidez do material, indicando que os modificadores tornam o ligante mais flexível. Essa flexibilidade pode ser vantajosa em regiões onde o material precisa acomodar deformações sem trincar.

Por outro lado, as Figuras 18b e 18d evidenciam os valores de δ , que refletem o comportamento viscoelástico do material. O ligante puro apresenta valores de δ menores em comparação aos ligantes modificados. Isso indica que os ligantes modificados têm uma menor resposta elástica, ou seja, têm um comportamento mais fluido. Essa menor resposta elástica, caracterizada por valores de δ mais próximos de 90° , sugere que os ligantes modificados dissipam mais energia durante a aplicação de carga, reduzindo o risco de trincas térmicas.

Figura 19 – Curvas mestras do módulo complexo $|G^*|$ (a, c) e ângulo de fase (δ) (b, d) em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para as amostras envelhecidas de AOP (a, b) e AOF (c, d)



Fonte: Elaborada pela autora.

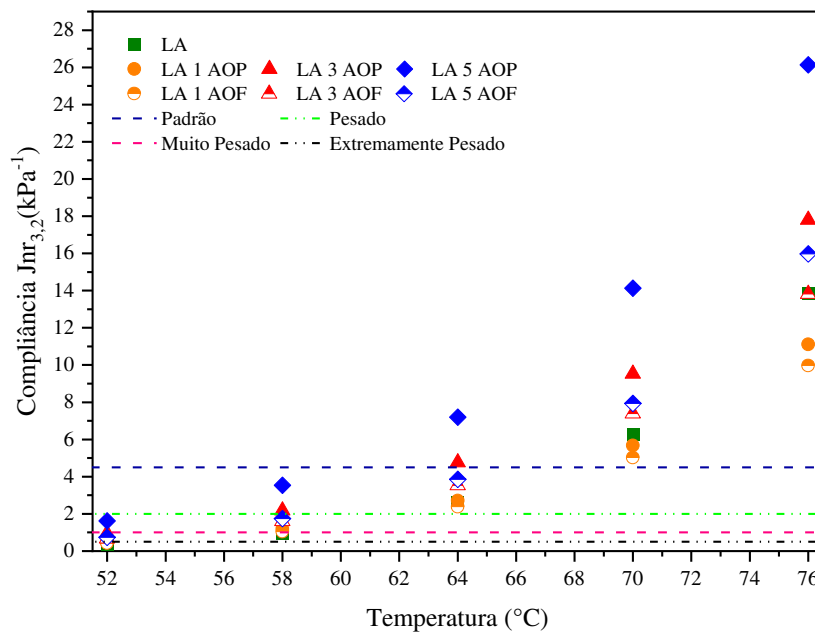
Nos ligantes envelhecidos, como esperado, ocorre uma redução nos valores de $|G^*|$, Figuras 19a e 19c, indicando maior rigidez devido ao endurecimento causado pela oxidação. Os ligantes modificados com AOP e AOF apresentam valores de $|G^*|$ menores em comparação ao ligante puro envelhecido, demonstrando que os aditivos ajudaram a mitigar o endurecimento. Nos gráficos do ângulo de fase (Figuras b e d), observa-se que δ aumenta com a elevação da temperatura para todas as amostras, atingindo um valor máximo em uma faixa intermediária antes de começar a diminuir. Esse comportamento reflete a transição do ligante de um estado elástico (baixo δ) para um estado mais viscoso (alto δ) em temperaturas crescentes. As amostras modificadas com amidas apresentam valores de δ superiores aos do ligante puro em toda a faixa de temperatura. Em altas temperaturas, essa característica é ainda mais evidente, destacando o efeito plastificante das amidas.

De modo geral, os resultados reforçam que a AOF é um modificador promissor, onde a redução da rigidez ($|G^*|$ menor) e a menor resposta elástica (δ maior) podem melhorar a flexibilidade e a durabilidade do pavimento. No entanto, o comportamento mais viscoso pode comprometer a resistência à deformação permanente em climas quentes ou sob cargas prolongadas.

5.2.4 Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR)

A Figura 20 apresenta os valores obtidos de J_{nr} em 3,2 kPa para os ligantes asfálticos modificados com AOP e AOF em diferentes proporções (1%, 3% e 5% em massa) em função da temperatura. As linhas de referência, representando as classificações de desempenho do ligante (Padrão, Pesado, Muito Pesado e Extremamente Pesado), permitem avaliar a resistência de cada material à deformação permanente em diferentes condições.

Figura 20 – Evolução do nível de tráfego para amostras de ligante puro e modificado com AOP e AOF em diferentes temperaturas



Fonte: Elaborada pela autora.

A modificação do LA com a AOP mostrou um comportamento dependente da concentração. Na proporção de 1%, os valores de J_{nr} permaneceram próximos aos do ligante puro, indicando que essa concentração não compromete significativamente a resistência do ligante à deformação permanente. Contudo, à medida que a concentração de AOP aumentou

para 3% e 5%, observou-se um aumento progressivo nos valores de J_{nr} , principalmente em temperaturas mais altas. Esses valores ultrapassam os limites das classificações "Pesado" e "Muito Pesado", sugerindo que o aumento da concentração de AOP reduz a rigidez do ligante, tornando-o mais suscetível à deformação permanente, especialmente sob condições de temperatura elevada. Isto corrobora os resultados mostrados anteriormente nas análises de varredura de frequência e temperatura.

Por outro lado, o comportamento do aditivo AOF foi mais estável em relação ao ligante puro, sobretudo em concentrações de 1% e 3%. Nessas proporções, os valores de J_{nr} permaneceram próximos aos do ligante puro, indicando que a AOF não comprometeu significativamente a resistência à deformação permanente nessas condições. Entretanto, na concentração de 5%, os valores de J_{nr} aumentaram de maneira mais acentuada, ultrapassando os limites das classificações superiores em temperaturas elevadas, embora ainda fossem inferiores aos valores registrados para a AOP na mesma concentração. Isso sugere que, mesmo em concentrações mais altas, a AOF apresenta um impacto menos negativo sobre a resistência do ligante à deformação permanente, em comparação à AOP. Essa diferença de desempenho pode estar relacionada às características químicas da AOF, derivada de óleo de fritura, que contém compostos oxigenados e outros subprodutos formados durante o uso do óleo, os quais podem contribuir para uma maior estabilidade estrutural do ligante.

Com o aumento da temperatura, foi possível observar uma tendência geral de aumento nos valores de J_{nr} para todos os ligantes, o que reflete o comportamento típico dos materiais asfálticos, cuja viscosidade diminui com o calor, resultando em maior suscetibilidade à deformação. No entanto, os ligantes modificados, especialmente com concentrações mais altas de AOP e AOF, mostraram maior sensibilidade à elevação da temperatura, o que é mais evidente nos casos em que os valores de J_{nr} ultrapassam os limites superiores das classificações.

A Tabela 5 apresenta os valores de J_{nr} dos ligantes asfálticos puros e modificados com diferentes concentrações dos aditivos AOP e AOF, em função da temperatura, e sua classificação, apenas para valores abaixo de 4,2 kPa, conforme os níveis de tráfego estabelecidos pela norma AASHTO M320 (2017). Essa classificação determina a adequação do ligante para diferentes condições de carregamento e deformação, com base no valor de J_{nr} , onde menores valores correspondem a maior rigidez e resistência à deformação permanente.

Tabela 5 – Indicação de níveis de tráfego para o ligante asfáltico puro e modificado com AOP e AOF

Amostras	J_{nr} 3,2 (kPa⁻¹)				
	Temperatura (°C)				
	52	58	64	70	76
LA	0,33 (E)	0,98 (V)	2,62 (S)	6,27 (-)	13,87 (-)
LA-1-AOP	0,465 (E)	1,191 (H)	2,711 (S)	5,676 (-)	11,112 (-)
LA-3-AOP	0,948 (V)	2,187 (S)	4,765 (-)	9,536 (-)	17,802 (-)
LA-5-AOP	1,626 (H)	3,539 (S)	7,203 (-)	14,126 (-)	26,134 (-)
LA-1-AOF	0,423 (E)	1,041 (H)	2,373 (S)	5,022 (-)	9,966 (-)
LA-3-AOF	0,672 (V)	1,603 (H)	3,540 (S)	7,397 (-)	13,828 (-)
LA-5-AOF	0,742 (V)	1,752 (H)	3,852 (S)	7,944 (-)	15,975 (-)

E= Extremamente pesado; V = Muito Pesado; H = Pesado; S = Padrão

Fonte: Elaborada pela autora.

Observa-se que a modificação do ligante asfáltico com AOP, na proporção de 1% em massa, apresenta valores de J_{nr} próximos aos do ligante asfáltico de referência. No entanto, para as proporções de 3% e 5% em massa, os valores obtidos são superiores aos do ligante de referência em todas as temperaturas analisadas. Por outro lado, a modificação com o aditivo AOF, nas proporções de 1%, 3% e 5% em massa, resultou em valores de J_{nr} próximos aos do ligante asfáltico de referência. Os resultados obtidos para as amostras modificadas com AOP e AOF em diferentes proporções indicam que o ligante asfáltico suporta uma maior incorporação de AOF, em massa, sem comprometer suas propriedades relacionadas à deformação permanente.

Desta forma, somente as modificações LA 1% AOP, LA 1% AOF, LA 3% AOF e LA 5% AOF permaneceram na classificação MSCR de nível padrão a temperatura de 64 °C. Esse resultado sugere que os aditivos estudados podem produzir melhoras em ligantes asfálticos mais rígidos, com valores de penetração menor que o utilizado nesse estudo (classificação 50-70).

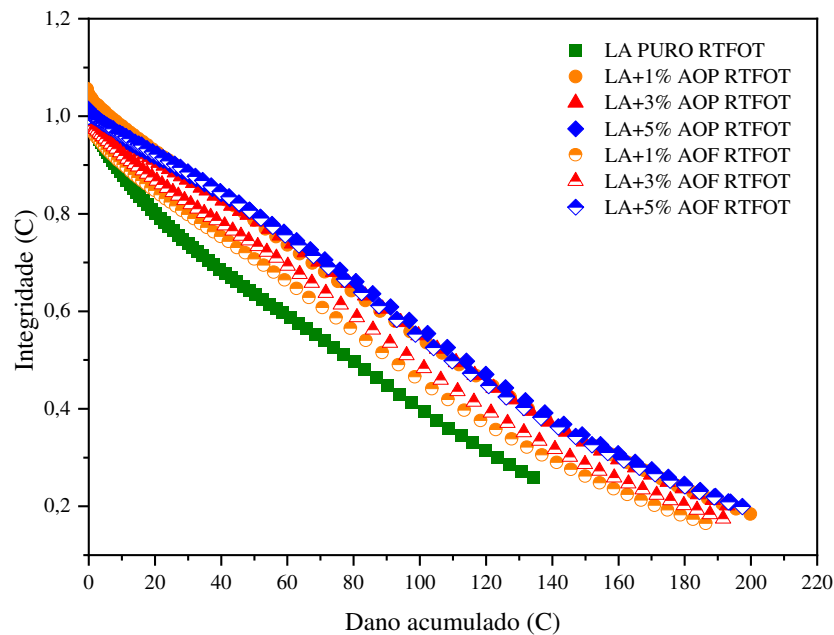
5.2.5 Ensaio de varredura de amplitude linear (LAS)

Neste ensaio, os ligantes foram testados por meio do ensaio de varredura de amplitude linear (LAS), onde foi possível obter parâmetros de fadiga para o ligante asfáltico, tanto na forma pura quanto modificada com amidas, após o envelhecimento a

curto prazo (RTFOT). Os ensaios foram conduzidos a 25°C, e os resultados foram analisados pelo método de dano contínuo viscoelástico (VECD).

A Figura 21 apresenta as curvas de Integridade (C) em função do Dano acumulado (D) para diferentes concentrações dos modificadores à base de amidas. Esses resultados permitem avaliar a resposta estrutural do ligante asfáltico modificado, destacando a influência desses aditivos na resistência ao dano sob condições de carregamento cíclico.

Figura 21 – Análise da Integridade (C) em função do Dano Acumulado (D) para as amostras de ligantes puro e modificados



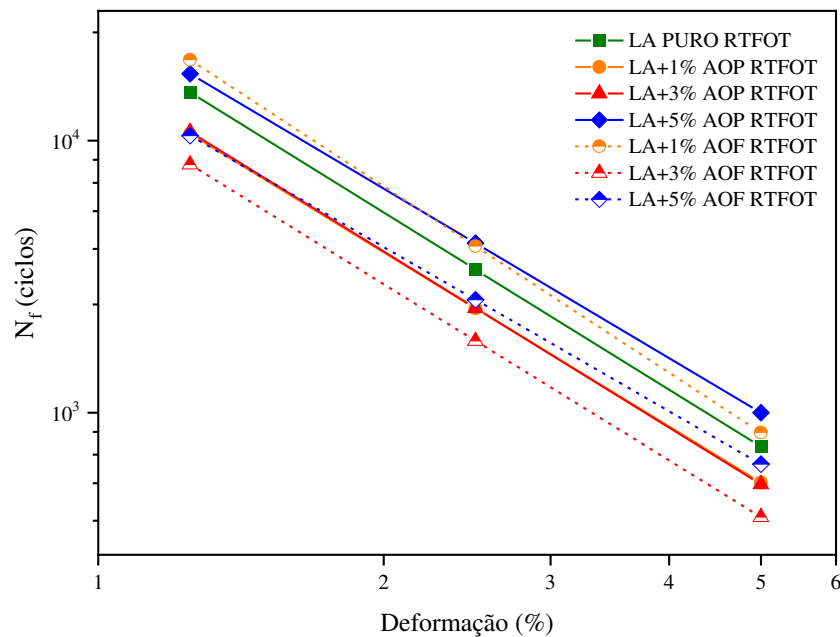
Fonte: Elaborada pela autora.

Observa-se que todas as amostras modificadas apresentam melhor integridade em relação ao ligante puro ao longo de toda a faixa de dano, indicando uma maior capacidade de suportar ciclos de carregamento antes da falha. Esse comportamento sugere que a incorporação dos modificadores melhora a resistência à degradação estrutural do material.

Além disso, nota-se que as amostras contendo AOP exibem um comportamento similar entre si e apresentam desempenho superior em comparação às amostras modificadas com AOF. No entanto, a amostra modificada com 5% de AOF se diferencia das demais amostras contendo AOF, apresentando um comportamento mais próximo ao das formulações com AOP. Esse resultado indica que a concentração e o tipo de modificador influenciam diretamente a resposta mecânica do ligante.

A Figura 22 apresenta o comportamento dos ligantes em relação à sua vida útil à fadiga (N_f), permitindo avaliar a influência dos aditivos na resistência à fadiga do material.

Figura 22 – Análise da resistência à fadiga em amostras de ligantes puro e modificados em diferentes deformações



Fonte: Elaborada pela autora.

Observa-se que as amostras modificadas com 1% de AOP, 3% de AOP e 5% de AOF apresentaram uma menor vida à fadiga em comparação ao ligante puro, comportamento semelhante ao observado para o ligante modificado com 3% de AOF, que apresentou o menor valor de vida útil dentre todas as amostras avaliadas.

Por outro lado, as amostras contendo 5% de AOP e 1% de AOF demonstraram uma maior vida à fadiga em relação ao ligante puro. Além disso, entre essas duas formulações, a amostra com 1% de AOF apresentou melhor desempenho em baixas deformações, enquanto, em altas deformações, sua vida à fadiga foi reduzida, sugerindo uma possível limitação do material sob condições de deformação mais severas.

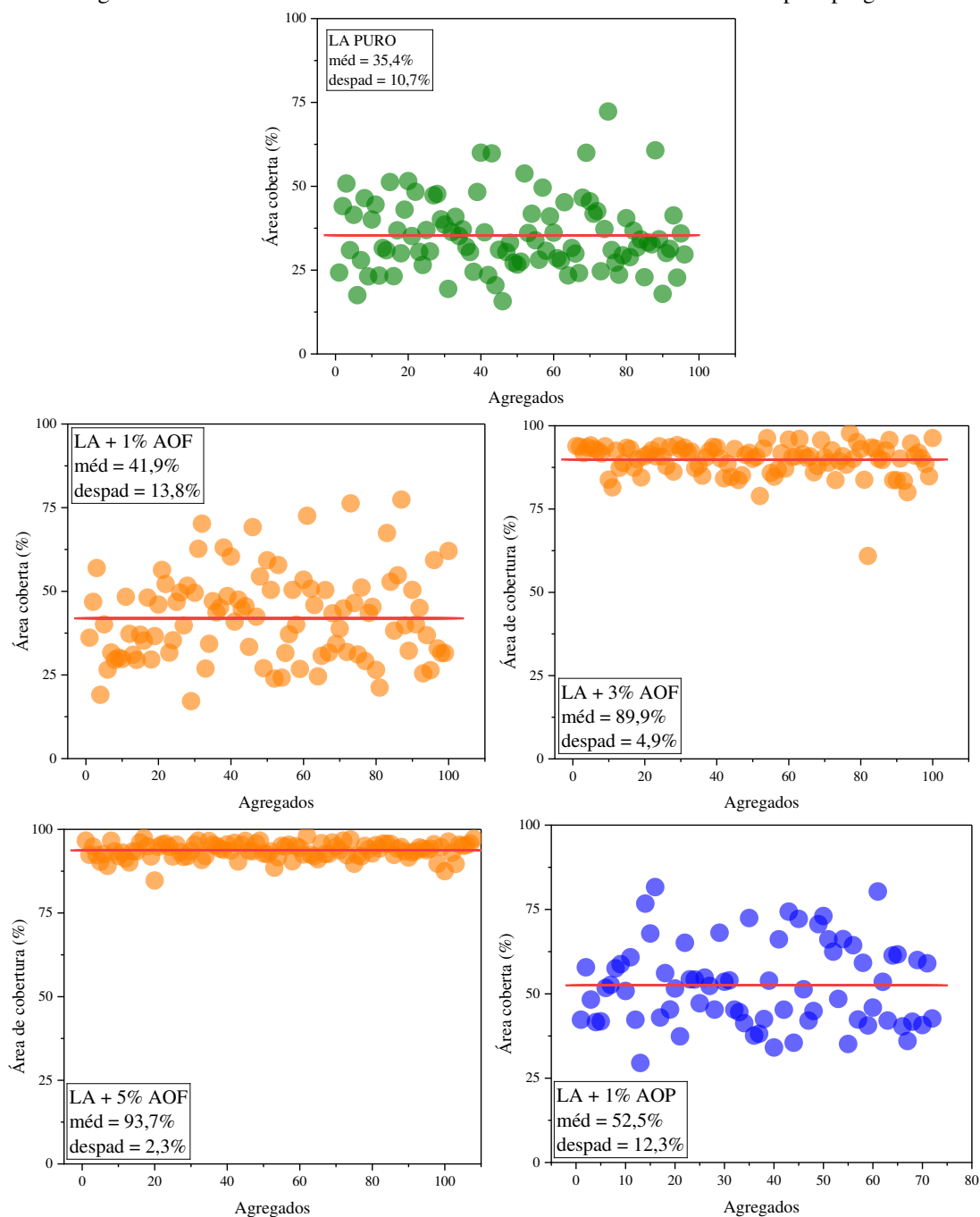
Esses resultados indicam que a modificação do ligante com diferentes teores de AOP e AOF impacta sua resistência à fadiga, sendo necessário avaliar a interação entre os aditivos.

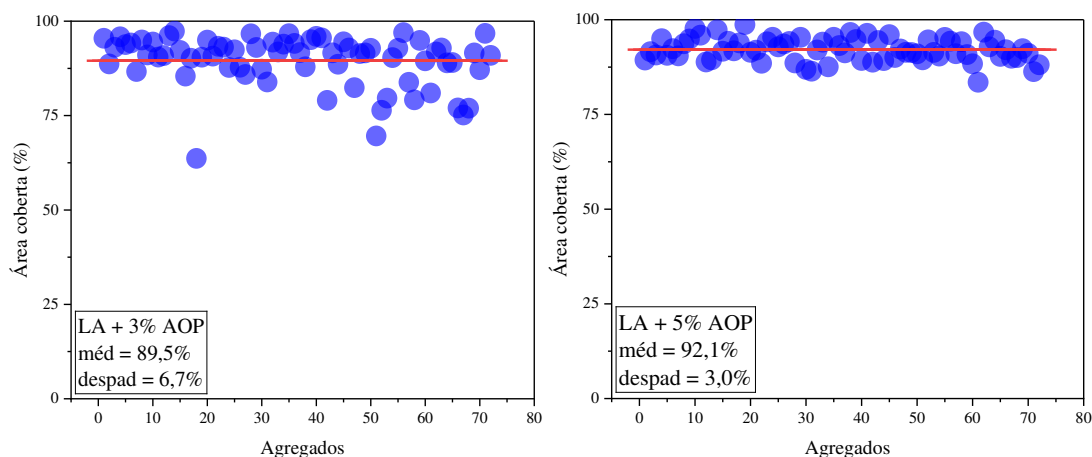
5.3 Adesividade

Os dados apresentados na Figura 23 e na Tabela 6 mostram os resultados dos testes de adesividade do ligante asfáltico (LA) modificado com diferentes concentrações de

amidas. A análise evidencia o impacto das concentrações de 1%, 3% e 5% dessas amidas na adesividade, que, de modo geral, apresentou melhor desempenho do que o LA puro.

Figura 23 – Resultados do teste de adesividade através do DIP fornecidos pelo programa





Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 6 – Dados do teste de adesividade através do DIP fornecidos pelo programa

(%)	LA PURO	LA+1% AOF	LA+3% AOF	LA+5% AOF	LA+1% AOP	LA+3% AOP	LA+5% AOP
Área de cobertura média	35,4	41,9	89,9	93,7	52,5	89,5	92,1
Desvio padrão	10,7	13,8	4,9	2,3	12,3	6,7	3,0

Fonte: Elaborada pela autora.

No caso do LA modificado com AOF, a adesividade média com 1% de amida é de 41,9%, com um desvio padrão elevado de 13,8%, indicando baixa eficiência adesiva e alta variabilidade nos resultados. Quando a concentração de AOF é aumentada para 3%, a adesividade média sobe para 89,0%, com uma redução significativa no desvio padrão para 4,9%. Isso demonstra que o aumento na concentração de AOF melhora consideravelmente o desempenho do ligante asfáltico. Com 5% de AOF, o desempenho é ainda melhor, com uma adesividade média de 93,7% e um desvio padrão de apenas 2,3%, indicando alta eficiência e consistência.

Já no caso do LA modificado com AOP, observa-se uma tendência similar. Com 1% de amida, a adesividade média é de 52,2%, com um desvio padrão de 12,3%. Embora o desempenho seja superior ao de 1% AOF, ainda apresenta variabilidade considerável. Quando a concentração de AOP aumenta para 3%, a média de adesividade cresce para 86,6%, enquanto o desvio padrão diminui para 6,7%, evidenciando uma melhoria significativa na eficiência e estabilidade. Com 5% de AOP, a adesividade atinge 92,1%, com um desvio padrão de 3,0%, mostrando que concentrações mais altas de AOP também resultam em excelente desempenho.

De forma geral, tanto a AOF quanto a AOP mostram uma melhora no desempenho adesivo do ligante asfáltico à medida que sua concentração aumenta. Em concentrações mais baixas (1%), a AOP apresenta desempenho ligeiramente superior à AOF. No entanto, em concentrações mais altas (3% e 5%), ambas as amidas têm desempenhos muito similares, com pequenas diferenças que não comprometem a eficiência. Isso sugere que a AOF pode ser uma alternativa sustentável e igualmente eficaz em comparação à AOP.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho demonstram a viabilidade do uso de amidas de óleo de soja de fritura (AOF) como modificadores de ligantes asfálticos, destacando-se pelos seguintes aspectos:

1. A síntese das amidas a partir dos óleos de soja puro e residual foi bem-sucedida, conforme confirmado pelas análises de FTIR e RMN. A conversão dos ésteres metílicos em amidas ocorreu de maneira eficiente, validando o método adotado e demonstrando viabilidade técnica para a produção desses aditivos.
2. Os resultados indicaram que a adição das amidas, especialmente da AOF, contribuiu para a redução da viscosidade do ligante, permitindo temperaturas de usinagem e compactação (TUCs) mais baixas. Esse efeito é promissor para minimizar o consumo energético e as emissões durante o processo de pavimentação.
3. Os ensaios reológicos mostraram que a incorporação das amidas reduziu a rigidez do ligante, tornando-o mais flexível e, potencialmente, mais resistente a fissuração térmica. No entanto, observou-se que concentrações mais elevadas de amida podem comprometer a resistência à deformação permanente, especialmente sob tráfego intenso. Esse fator requer ajustes na formulação para equilibrar flexibilidade e estabilidade mecânica.
4. A modificação do ligante com amidas melhorou a interação ligante-agregado de forma significativa. A AOF apresentou desempenho comparável à AOP, indicando que o uso de óleo de soja residual pode ser uma alternativa viável e sustentável sem comprometer a adesividade.

Ademais, o ensaio de varredura de amplitude linear (LAS) indicou que as amostras modificadas com 3% e 5% de AOF apresentaram maior capacidade de resistir a deformações cíclicas, sugerindo um aumento na resistência à fadiga. As amostras modificadas demonstraram maior vida útil sob condições de tensão repetida em comparação ao ligante

puro. Além disso, a análise térmica (TGA e DSC) confirmou a estabilidade térmica dos aditivos, indicando que as amidas derivadas dos óleos de soja mantêm sua integridade em temperaturas operacionais típicas da pavimentação. O ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR) revelou que as amostras modificadas com 3% e 5% de AOF apresentaram melhor desempenho em resistência à deformação permanente, evidenciando a eficácia desses aditivos na melhoria das propriedades reológicas.

Apesar dos resultados promissores, alguns desafios ainda precisam ser superados. É essencial otimizar o equilíbrio entre a redução da viscosidade e a manutenção da resistência mecânica para garantir um desempenho adequado em diferentes condições operacionais. Além disso, recomenda-se a realização de estudos adicionais para avaliar a durabilidade do material modificado em longo prazo, considerando fatores como envelhecimento do ligante, variações de temperatura e cargas cíclicas em condições reais de tráfego.

Sob a perspectiva ambiental, o uso de amidas derivadas de óleos vegetais residuais representa um avanço significativo em direção à sustentabilidade na pavimentação. A reutilização de óleos de fritura reduz a geração de resíduos e minimiza o descarte inadequado, que frequentemente causa impactos ambientais severos. Além disso, a redução das temperaturas de usinagem e compactação contribui para a diminuição do consumo de combustíveis fósseis e das emissões de gases de efeito estufa, reforçando os benefícios ambientais desse tipo de modificação.

Assim, esta pesquisa destaca a importância de soluções inovadoras e sustentáveis para a infraestrutura viária, alinhando-se aos princípios da economia circular e às metas globais de mitigação das mudanças climáticas. Os resultados obtidos evidenciam o potencial das amidas derivadas do óleo de soja residual como modificadores sustentáveis para ligantes asfálticos. Esses aditivos reduzem as temperaturas de usinagem, melhoram a adesividade e as propriedades reológicas, tornando-se uma alternativa viável para melhorar o desempenho mecânico e ambiental das misturas asfálticas.

Para validar sua aplicação em larga escala, futuras pesquisas devem investigar os efeitos a longo prazo em misturas asfálticas reais, considerando diferentes condições climáticas, níveis de tráfego e processos de envelhecimento. Dessa forma, este estudo contribui para o desenvolvimento de soluções ambientalmente responsáveis e alinhadas às exigências da engenharia de pavimentação moderna.

REFERÊNCIAS

AIREY, G. D. **Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens.** *Fuel*, v. 82, p. 1709–1719, 2003.

ALATAŞ T.; KİZİRGİL, M.E. **The effects of using Styrene-Butadiene-Styrene and fly ash together on the resistance to moisture-induced damage, permanent deformation and fatigue of hot mixture asphalt.** *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 17, n. 5, p. 1030-1039, 2013.

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

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 320:** Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder, Washington, D.C., 2017.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 332:** Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) Test. Washington, D.C.: AASHTO, 2018.

ARABANI, M.; ROSHANI, H.; HAMED, G. H. **Estimating Moisture Sensitivity of Warm Mix Asphalt Modified with Zycosoil as an Antistrip Agent Using Surface Free Energy Method.** *Journal of Materials in Civil Engineering*. 24. 889-897, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6576:** Materiais betuminosos - Determinação da penetração. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D36/D36M – 14:** Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D2872-22:** Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). ASTM International, 2022.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D4402/D4402M-23:** Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D7175/D7175M:** Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.

ASTM INTERNATIONAL. **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.

AWOGBEMI, O.; ONUH, E. I.; INAMBAO, F. L. **Comparative study of properties and fatty acid composition of some neat vegetable oils and waste cooking oils.** *International Journal of Low-Carbon Technologies*, v. 14, n. 3, p. 417–425, set. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz038>.

BAHIA, H. U.; ANDERSON, D. A. **The new proposed rheological properties of asphalt binders: why are they required and how do they compare to conventional properties.** In: *Physical Properties of Asphalt Cement Binders*. West Conshohocken, PA: ASTM International, p. 1-15, 1995.

BAI, Tao; HU, Zi-ang; HU, Xiaodi; LIU, Yang; FUENTES, Luis; WALUBITA, Lubinda F. **Rejuvenation of short-term aged asphalt-binder using waste engine oil.** *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 47, n. 7, p. 822-832, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0268>.

BERGMAN, R. G. **C-H activation.** *Nature* 2007 446:7134, v. 446, n. 7134, p. 391-393, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras, 2022.

BRANTHAVER, J. F.; PETERSEN, J. C.; ROBERTSON, R. E.; et al. **Binder characterization and evaluation.** Vol. 2: Chemistry. Report: SHRP-A-368. Washington, D.C.: Strategic Highway Research Program, 1993.

CÁRDENAS, J.; ORJUELA, A.; SÁNCHEZ, D. L.; NARVÁEZ, P. C.; KATRYNIOK, B.; CLARK, J. **Pre-treatment of used cooking oils for the production of green chemicals: A review.** *Journal of Cleaner Production*, v. 289, p. 125129, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125129>.

CLAYDEN, J., GREEVES, N., WARREN, S., **Organic Chemistry**, 2nd Edition, Oxford, New York, 2012.

CHEN, C.; LU, J.; MA, T.; ZHANG, Y.; GU, L.; CHEN, X. **Applications of vegetable oils and their derivatives as bio-additives for use in asphalt binders: A review.** *Construction and Building Materials*, v. 383, p. 131312, 2023. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131312>.

CHEN, Y.; LI, X.; TIAN, X. **Performance evaluation of soybean oil/SBR reclaimed asphalt and mixtures.** *Buildings*, v. 14, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings14072085>.

CHERAGHIAN, G.; FALCHETTO, A.C.; YOU, Z.; CHEN, S.; KIM, Y.S.; WESTERHOFF, J.; MOON, K.H.; WISTUBA, M.P. **Warm Mix Asphalt Technology: an up-to-date review.** *Journal of Cleaner Production*, v. 268, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122128>.

CONG, Y.; ZHANG, W.; LIU, C. **Composition and Oil-Water Interfacial Tension Studies in Different Vegetable Oils**. *Food Biophysics*, v. 15, p. 229-239, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11483-019-09617-8>.

CRAVO, M. C. C. **Efeitos do Envelhecimento Térmico e Fotoquímico em Ligantes Asfálticos, Mástique e Matriz de Agregados Finos**. 2016. 280p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **DNER-ME 078/94: Agregado graúdo – Adesividade a ligante asfáltico: método de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 423/2020-ME: Pavimentação – Ligante asfáltico – Fluência e recuperação de ligantes asfálticos determinados sob tensões múltiplas (MSCR) – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: DNIT, 2020.

DOMINGOS, M. D. I.; PAMPLONA, T. F.; FAXINA, A. L.; GIGANTE, A. C. **Viscosidade rotacional de ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho**. *Transportes*, v. 20, n. 2, p. 15–22, 2012.

FERREIRA, A. G. A.; LIMA, W. X. P.; RIAL, R. C. **Nuclear magnetic resonance (NMR) applications in biodiesel characterization and quality – A review**. *Microchemical Journal*, v. 207, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.112226>.

FERROTTI, G.; RAGNI, D.; LU, X.; CANESTRARI, F. **Effect of warm mix asphalt chemical additives on the mechanical performance of asphalt binders**. *Materials and Structures*, v. 50, 2017, p. 226.

FREIRE, P. C. M.; MANCINI-FILHO, J.; FERREIRA, T. A. P. de C.. **Principais alterações físico-químicas em óleos e gorduras submetidos ao processo de fritura por imersão: regulamentação e efeitos na saúde**. *Revista de Nutrição*, Campinas, v. 26, n. 3, p. 353-368, maio/jun. 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rn/>. Acesso em: 28 jan. 2025.

GAO, J.; WANG, H.; LIU, C.; GE, D.; YOU, Z.; YU, M. **High-temperature rheological behavior and fatigue performance of lignin modified asphalt binder**. *Construction and Building Materials*, v. 230, 2020, p. 117063. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117063>.

GENG, H.; LI, L.; HAN, H. **Viscosity criteria and methodology for estimating the optimum compaction temperatures of polymer modified asphalt binders in hot mix asphalt**. *Construction and Building Materials*, v. 128, p. 308–314, 2016.

GOMES, O. J. F.; LUCAS JÚNIOR, J. L. O.; BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B. **Proposition of an aggregate-binder interface index based on the adhesiveness test assessed by digital image processing**. *Construction and Building Materials*, v. 438, p. 137006, 2024. Disponível em: [10.1016/j.conbuildmat.2024.137006](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137006).

HABAL, A.; SINGH, D. **Influence of Recycled Asphalt Pavement on Interfacial Energy and Bond Strength of Asphalt Binder for Different Types of Aggregates**. *Transportation*

Research Record: Journal of the Transportation Research Board., v. 2672, n. 28, p. 154-166, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0361198118784377>.

HOSSAIN, Z.; B. BAIRGI, B.; BELSHE, M. **Investigation of Moisture Damage Resistance of GTR-Modified Asphalt Binder by Static Contact Angle Measurements**. Arkansas, v. 95, p. 45–53, 2015. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000455](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000455).

HU, Z.; ZHANG, H.; WANG, S.; XU, T. **Thermal-oxidative aging mechanism of asphalt binder based on isothermal thermal analysis at the SARA level**. Construction and Building Materials, v. 255, 2020.

HUANG, B.; SHU, X.; DONG, Q.; SHEN, J. **Laboratory evaluation of moisture susceptibility of hot-mix asphalt containing cementitious fillers**. Journal of Materials in Civil Engineering, Tennessee, v. 22, n. 7, p. 667-673, 2010.

ISLAM, M. R.; BEG, M. D. H.; JAMARI, S. S. **Development of vegetable-oil-based polymers**. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 131, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.40787>.

Ji, Jie; YAO, Hui; SUO, Zhi; YOU, Zhanping; LI, Haoxin; XU, Shifa; SUN, Lijun. **Effectiveness of vegetable oils as rejuvenators for aged asphalt binders**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 29, n. 3, p. 04017029, 2017. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001769](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001769).

LEE, S.-J.; AMIRKHANIAN, S. N.; KIM, K. W.; PARK, N. O. **Characterization of Warm Mix Asphalt Binders Containing Artificially Long-Term Aged Binders**. Construction and Building Materials, v. 23, n. 6, p. 2371-2379, 2009.

LI, Na; JIANG, Qi; WANG, Fusong; XIE, Jun; LI, Yuanyuan; LI, Jiashuo; WU, Shaopeng. **Emission behavior, environmental impact and priority-controlled pollutants assessment of volatile organic compounds (VOCs) during asphalt pavement construction based on laboratory experiment**. *Journal of Hazardous Materials*, v. 398, p. 122904, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122904>.

LI, Y.; FU, L.; LAI, S.; CAI, X.; YANG, L. **Synthesis and characterization of cast resin based on different saturation epoxidized soybean oil**. *European Journal of Lipid Science and Technology*, v. 112, p. 511-516, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ejlt.200900191>.

LIU, Qian; PEI, Jianzhong; LI, Rui; ZHAO, Xiaokang; MENG, Yejing; HE, Haiqi; SONG, Jiawei. **Influence of fatty acid amide foaming agents on the foaming effect and rheological properties of foamed asphalt**. *Construction and Building Materials*, v. 458, 2025. Disponível em: [10.1016/j.conbuildmat.2024.139721](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139721).

LUCAS JÚNIOR, J. O. L. **Influência da adesividade agregado-ligante no trincamento por fadiga de misturas asfálticas**. 2018. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2018.

- MASSON, J. F.; PELLETIER, L.; COLLINS, P. **Rapid FTIR method for quantification of styrene-butadiene type copolymers in bitumen.** *Journal of Applied Polymer Science*, v. 79, p.1034-1041, 2001.
- MERKEL, Daniel R.; KUANG, Wenbin; MALHOTRA, Deepika; PETROSSIAN, Gayaneh; ZHONG, Lirong; SIMMONS, Kevin L.; ZHANG, Jinwen; COSIMBESCU, Lelia. **Waste PET chemical processing to terephthalic amides and their effect on asphalt performance.** *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 8, n. 14, p. 5615-5625, 13 abr. 2020. Disponível em: [10.1021/acssuschemeng.0c00036](https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c00036).
- MO, Shicong; WANG, Yuhong; XIONG, Feng; AI, Chunjin. **Effects of asphalt source and mixing temperature on the generated asphalt fumes.** *Journal of Hazardous Materials*, v. 371, p. 342-351, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.025>.
- MORAES, R. **Investigation of mineral filler effects on the aging process of asphalt mastic.** Thesis. 2014
- MORAES, R. **Validation of the Bitumen Bond Strength Test Using Surface Energy Measurements.** MSc thesis. (Civil and Environmental Engineering) - University of Wisconsin. Wisconsin, 2011.
- MOTTA, R. S. **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissões de poluentes e de consumo energético.** Tese de Doutorado – USP. São Paulo, SP, Brasil, 2011.
- NAKHAEI, Mostafa; NADERI, Koorosh; NASREKANI, Aliasghar Akbari; TIMM, David H. **Moisture resistance study on PE-wax and EBS-wax modified warm mix asphalt using chemical and mechanical procedures.** *Construction and Building Materials*, v. 189, p. 882-889, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.216>.
- NASCIMENTO, T. C. B. **Efeito dos Envelhecimentos Termo-oxidativo e Foto oxidativo sobre Propriedades Reológicas de Ligantes Asfálticos Modificados.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes, Área de Concentração em Infraestrutura de Transporte) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- NDE, D. B.; FONCHA, A. C. **Optimization methods for the extraction of vegetable oils: a review.** *Processes*, v. 8, n. 2, p. 209, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr8020209>.
- NEVES FILHO, A. S. **Avaliação da Adição de Dopes no Comportamento de Misturas Asfálticas a Quente.** Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.
- NOGUEIRA, R; SOARES, J.; SOARES, S. **Rheological evaluation of cotton seed oil fatty amides as a rejuvenating agent for RAP oxidized asphalts.** *Construction and Building Materials*, v. 223, p. 1145-1153, 1 out. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.128>.

OMARI, I.; AGGARWAL, V.; HESP, S. **Investigation of two warm mix asphalt additives.** *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 9, n. 2, p. 83-88, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.02.001>.

OMOJOLA, A.; ONUH, E.; INAMBAO, F. **Comparative study of properties and fatty acid composition of some neat vegetable oils and waste cooking oils.** *International Journal of Low-Carbon Technologies*, v. 14, p. 417-425, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz038>.

PAVIA, D.L, LAMPMAN, G.M., KRIZ, G.S., JAMES, R. **Introdução a Espectroscopia**, Tradução da 4a edição norte-americana, *Cengage Learning*, Bellingham, Washington, 2010.

PORTO, M.; CAPUTO, P.; LOISE, V.; ESKANDARSEFAT, S.; TELTAYEV, B.; ROSSI, C. O. **Bitumen and Bitumen Modification: A Review on Latest Advances.** *Applied Scienc.* 7 ed., n. 742, 2019.

PORTUGAL, A. C. X.; LUCENA, L. C. de F. L.; LUCENA, A. E. de F. L.; COSTA, D. B. da. **Rheological performance of soybean in asphalt binder modification.** *Road Materials and Pavement Design*, v. 19, n. 4, p. 768–782, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1273845>.

QIU, Y.; DING, H.; SU, T. **Non-isothermal low-temperature reversible aging of commercial wax-based warm mix asphalts.** *International Journal of Pavement Engineering*, v. 23, n. 2, p. 514–522, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1757670>.

RAGNI, Davide; FERROTTI, Gilda; LU, Xiaohu; CANESTRARI, Francesco. **Effect of temperature and chemical additives on the short-term ageing of polymer modified bitumen for WMA.** *Materials & Design*, v. 160, p. 514-526, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.042>.

RAMADHANSSY, P. J. **Waste cooking oil as bio asphalt binder: A critical review.** *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 712, p. 012040, 2020. 3rd National Conference on Wind & Earthquake Engineering and International Seminar On Sustainable Construction Engineering, Kuala Lumpur, Malaysia. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/712/1/012040>.

RODRÍGUEZ-ALLOZA, Ana María; GALLEGO, Juan; PÉREZ, Ignacio. **Study of the effect of four warm mix asphalt additives on bitumen modified with 15% crumb rubber.** *Construction and Building Materials*, v. 43, p. 300-308, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.025>.

RUIZ-ARACAMA, Ainhoa; ALBERDI-CEDENO, Jon; NIEVA-ECHEVARRIA, Barbara; MARTINEZ-YUSTA, Andrea; GOICOECHEA-OSES, Encarnacion. **Effect of rosemary extract on sunflower oil degradation studied by 1H NMR: Differences under frying conditions and accelerated storage.** *Food Chemistry*, v. 474, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143146>.

SENIOR-ARRIETA, V.; CÓRDOBA-MAQUILÓN, J. E. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas porosas com amidas de ácidos graxos -FAA-.** *Engenharia e*

Investigação, v. 37, n. 1, p. 43-48, 2017. Disponível em:
<https://doi.org/10.15446/ing.investig.v37n1.57158>.

SILVA, J. A. A., RODRIGUES, J. K. G., CARVALHO, M. W., LUCENA, L. C. F. L., CAVALCANTE, E. H. **Avaliação reológica de ligante modificado com Politereftalato de etileno (PET)**. *Matéria*, 23, 11951, 2018

SINGH, P. P. **Biopolymers: recent trends and their applications**. In: AMBIKA. *Biopolymers: structure, performance and applications*. 2017. p. 271-286.

SOURTY, E. D.; TAMMINGA, A. Y.; MICHELS, M. A. J.; VELLINGA, W.-P.; MEIJER, H. E. H. **The microstructure of petroleum vacuum residue films for bituminous concrete: a microscopy approach**. *Journal of Microscopy*, v. 241, n. 2, p. 132-146, 2011.

SU, Jun-Feng; QIU, Jian; SCHLANGEN, Erik; WANG, Ying-Yuan. **Investigation of the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: In situ rejuvenation for aged bitumen**. *Construction and Building Materials*, v. 74, p. 83-92, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.018>.

SU, Ningyi; XIAO, Feipeng; WANG, Jingang; CONG, Lin; AMIRKHANIAN, Serji. **Productions and applications of bio-asphalts – A review**. *Construction and Building Materials*, v. 183, p. 578-591, 2018. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.118>.

UCHOA, A. F. J.; ROCHA, W. S.; FEITOSA, J. P. M.; NOGUEIRA, R. L.; BRITO, D. H. A. de; SOARES, J. B.; SOARES, S. A. **Bio-based palm oil as an additive for asphalt binder: Chemical characterization and rheological properties**. *Construction and Building Materials*, v. 285, p. 122883, 2021. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122883>.

WANG, C.; XUE, L.; XIE, W.; YOU, Z.; YANG, X. **Laboratory investigation on chemical and rheological properties of bioasphalt binders incorporating waste cooking oil**. *Construction and Building Materials*, v. 167, p. 348–358, 2018

WARGHA FILHO, N. **Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas**. Dissertação. UFC. 2013.

WEI, J.; DONG, F.; LI, Y.; ZHANG, Y. **Relationship analysis between surface free energy and chemical composition of asphalt binder**. *Construction and Building Materials*, v. 71, p. 116-123, 2014.

WEN, Haifang; BHUSAL, Sushanta; WEN, Ben. **Laboratory evaluation of waste cooking oil-based bioasphalt as an alternative binder for hot mix asphalt**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 25, n. 10, 2012. Disponível em:
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000713](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000713).

YAN, C.; HUANG, W.; TANG, N. **Evaluation of the temperature effect on Rolling Thin Film Oven aging for polymer modified asphalt**. *Construction and Building Materials*, v. 137, p. 485-493, 2017.

YANG, Peixing; DONG, Fuqiang; YU, Xin; GUO, Yongjia; JIN, Yong; CHEN, Bei; JIANG, Yang; LIU, Kaixin. **Molecular study on diffusion behavior and performance recovery of aged asphalt binder containing functional rejuvenators.** *Construction and Building Materials*, v. 407, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133536>.

YANG, X.; MILLS-BEALE, J.; YOU, Z. **Chemical characterization and oxidative aging of bio-asphalt and its compatibility with petroleum asphalt.** *Journal of Cleaner Production*, v. 142 (Part 4), p. 1837–1847, 2017.

YU, Huayang; CHEN, Qiwei; LIN, Yi; DONG, Niya. **Effect of wax additives on asphalt rheological behavior as road paving material.** *Materials Today Communications*, v. 37, p. 107044, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107044>.

ZHAO, Y.; CHEN, M.; WU, S.; ZHU, Y. **Feasibility assessment of palmitamide derived from waste edible oil as a warm mix asphalt additive.** *Construction and Building Materials*, v. 401, p. 132972, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132972>.

ZEFERINO, M; RAMOS, S. de F. Mercado Mundial de Óleos Vegetais: panorama e perspectivas. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, São Paulo, v. 18, n. 5, p. 1-8, maio 2023. Disponível em: <http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/LerTexto.php?codTexto=16138>. Acesso em: 28 nov. 2024.