



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII - ARARUNA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

BEN HUR ANDRADE DE MEDEIROS NÓBREGA

**INFLUÊNCIA DA BORRA DO ÓLEO DE SOJA APÓS PROCESSO DE
SECAGEM NO DESEMPENHO REOLÓGICO DO CAP 50/70.**

ARARUNA

2022

BEN HUR ANDRADE DE MEDEIROS NÓBREGA

**INFLUÊNCIA DA BORRA DO ÓLEO DE SOJA APÓS PROCESSO DESECAGEM NO
DESEMPENHO REOLÓGICO DO CAP 50/70**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado à Universidade Estadual da
Paraíba como requisito para obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Pavimentação.

Orientador: Prof. Me. Osires de Medeiros Melo Neto

ARARUNA

2022

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

N754i Nobrega, Ben Hur Andrade de Medeiros.
Influência da borra do óleo de soja após o processo de secagem do cap 50/70 [manuscrito] / Ben Hur Andrade de Medeiros Nobrega. - 2022.
50 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde , 2022.

"Orientação : Prof. Me. Osires de Medeiros Melo Neto ,
Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."

1. Asfalto. 2. Resíduo . 3. Óleo vegetal. I. Título

21. ed. CDD 625.85

BEN HUR ANDRADE DE MEDEIROS NÓBREGA

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DA BORRA DO ÓLEO DE SOJA APÓS PROCESSO
DE SECAGEM NO DESEMPENHO REOLÓGICO DO LIGANTE ASFÁLTICO

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

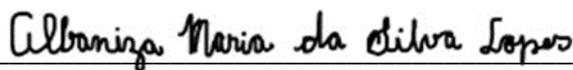
Área de concentração: Pavimentação

Aprovado em: 06/12/2022.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Osires de Medeiros Melo Neto (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Me. Albaniza Maria da Silva Lopes (Examinador Interno)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dra. Yáscara Maia Araújo de Brito (Examinador Interno)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

A minha família, em especial aos meus pais, minhas irmãs e o meu sobrinho, pelo amor carinho e incentivo, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus. Pela vida, saúde, proteção e sabedoria, e por estar concluindo o meu curso, pela inspiração e paz.

Aos meus pais Joelcio e Ana. Pelo amor incondicional, por tudo que me deram, pelo exemplo e incentivo, sempre.

A minha madrastra Ângela, por todo suporte e carinho.

As minhas irmãs Sabrina e Samanta, pelo apoio, companheirismo e amor.

Ao meu sobrinho Benjamin, que mesmo com poucos meses de vida, já faz parte da minha história.

Ao meu orientador, Prof. Osires de Medeiros Melo Neto, pelas portas abertas e por estar sempre disposto a me ajudar no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço pela oportunidade e pela confiança depositada.

A todos os professores do Centro Acadêmico de Engenharia Civil (CAEC – UEPB) não só por todo o conhecimento, mas também por todas as contribuições na minha jornada acadêmica, lições de vida e humanidade. Em especial, o professor Daniel Baracuy, que além de docente, virou um amigo.

Aos membros da banca examinadora, pela disposição e enriquecedoras contribuições.

Aos meus amigos de turma Eugênio Pacelli, Jeferson Araújo e Jo. Esta caminhada foi muito mais leve por ter vocês ao meu lado.

Aos meus amigos de longa data, Ygor Wanderley, Thiago Lima, Lucas Lacerda, Gianott Oliveira, Gabriel Pires, Guilherme Costa, Arthur Reis, Diego Freitas, Geovanny Iury, Hugo Tenaglia, Rian Branco, Pedro Palhano, Alexandre Felipe, Juninho Maciel, Ana Luiza Lima e Hyanca Yasmin, por sempre se fazerem presentes e me incentivarem a alcançar os meus objetivos.

A todos os meus amigos e familiares. Obrigado pela paciência nestes anos, e por sempre torcerem pelas minhas conquistas.

A todos aqueles que direta ou indiretamente estiveram presentes durante a minha trajetória acadêmica e àqueles que contribuíram para a conclusão deste trabalho, muito obrigado.

À UFCG, por permitir o uso do Laboratório de Engenharia de Pavimentos para a realização dos ensaios da pesquisa.

À Cordilheira pelo ligante asfáltico cedido para utilização dos ensaios.

À IMCOPA, por ceder a borra do óleo de soja para a realização dos ensaios.

“O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza de seus sonhos”.

Eleanor Roosevelt

RESUMO

O modal rodoviário tem se destacado nos últimos 30 anos como o mais utilizado no Brasil, visto que apresenta uma flexibilidade de tráfego, além de maior eficácia e rapidez em curtas distâncias. O pavimento asfáltico é o tipo mais utilizado em rodovias pavimentadas no país. Atrelado a isso, sabe-se que a preservação do meio ambiente é umas das maiores preocupações da humanidade, logo, novas tecnologias surgem com o intuito de diminuir os efeitos que a ação humana causa à natureza. Diante disso, o manuseio de misturas asfálticas em altas temperaturas produz emissão de gases e outras substâncias químicas poluentes que afetam a qualidade do ar, contribuindo negativamente para o efeito estufa. As misturas asfálticas mornas (MAMs) são produzidas por meio de óleos naturais ou sintéticos, que além de atuarem como agente rejuvenescedor, torna o ligante asfáltico mais flexível e resistente. Com o objetivo de reduzir a temperatura nas fases de produção da mistura asfáltica, esta pesquisa analisou a influência da adição da borra do óleo de soja após o processo de secagem (BSS) no comportamento reológico do ligante asfáltico com penetração 50/70 como redutora de viscosidade nos teores de 1%, 3% e 5%. A metodologia utilizada baseou-se na caracterização do ligante asfáltico por meio de ensaios reológicos como viscosidade rotacional, *performance grade* (PG); antes e após o envelhecimento a curto prazo (RTFO), e *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR). Após a realização dos ensaios, notou-se um comportamento semelhante das amostras em relação ao ligante asfáltico puro. As amostras de ligantes asfálticos modificados pela borra do óleo de soja seca em todos os teores testados apresentaram valores de viscosidade equivalentes ao do ligante puro, assim como as temperaturas de mistura e compactação, não alcançando a obtenção de misturas asfálticas mornas. A borra do óleo de soja seca proporcionou variações nas reduções da temperatura de PG, o que inviabilizou o seu uso como agente rejuvenescedor para misturas asfálticas mornas nesses teores.

Palavras-chave: Mistura asfáltica morna; Viscosidade; Resíduo; Óleo vegetal.

ABSTRACT

The road modal has stood out over the last 30 years as the most used in Brazil, as it presents traffic flexibility, in addition to greater efficiency and speed over short distances. Asphalt pavement is the type most used on paved highways in the country. It is known that the preservation of the environment is one of the greatest concerns of humanity, therefore, new technologies appear in order to reduce the effects that human action causes on nature. Therefore, the handling of asphalt mixtures at high temperatures produces the emission of gases and other polluting chemical substances that affect air quality, contributing negatively to the greenhouse effect. Warm asphalt mixtures (MAMs) are produced using natural or synthetic oils, which in addition to acting as a rejuvenating agent, make the asphalt binder more flexible and resistant. With the objective of reducing the temperature in the production phases of the asphalt mixture, this research analyzed the influence of the addition of soybean oil dregs after the drying process (BSS) on the rheological behavior of the asphalt binder with 50/70 penetration in the contents of 1%, 3% and 5%. The methodology used was based on the characterization of the asphalt binder through rheological tests such as rotational viscosity, performance grade (PG); before and after short-term aging (RTFO), and Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR). After carrying out the tests, similar behavior of the samples was noticed in relation to the pure asphalt binder. Samples of asphalt binders modified by dry soybean oil sludge at all contents tested showed viscosity values equivalent to those of the pure binder, as well as mixing and compaction temperatures, not achieving warm asphalt mixtures. Dried soybean oil sludge did not reduce the temperature of PG, making its use as a rejuvenating agent for recycled asphalt mixtures unfeasible.

Keywords: Warm asphalt mix; Viscosity; Waste; Vegetable oil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas para usinagem (números aproximados).....	21
Figura 2 - Borra do óleo de soja	22
Figura 3 - FTIR da borra do óleo de soja.....	23
Figura 4 - Estufa e amostra utilizadas no processo de secagem	27
Figura 5 - Bandeja circular e as amostras antes e depois da secagem	27
Figura 6 - Estufa RTFO	29
Figura 7 - Arranjo dos materiais do ensaio de viscosidade rotacional: a) esboço do equipamento, b) esboço do eixo na amostra do ligante asfáltico	30
Figura 8 - Amostras para o ensaio de viscosidade rotacional.....	30
Figura 9 - Reômetro de cisalhamento dinâmico	31
Figura 10 - Amostras para o ensaio MSCR.....	33
Figura 11 - Gráfico viscosidade versus temperatura	35
Figura 12 - Grau de desempenho dos ligantes asfálticos puro e modificado (PG).....	37
Figura 13 - Grau de desempenho dos ligantes asfálticos puro e modificado (PG contínuo)	37
Figura 14 - Valores do parâmetro Módulo Complexo (G^*) em função da temperatura antes e após o RTFO.....	39
Figura 15 - Índice de envelhecimento dos ligantes asfálticos	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da caracterização da borra do óleo de soja.....	23
Tabela 2 - Caracterização do ligante asfáltico puro (AB)	25
Tabela 3 - Nomenclatura das amostras utilizadas neste estudo	28
Tabela 4 - Classificação de nível de carregamento do pavimento com base nos valores de Jnr	33
Tabela 5 - Dados de viscosidade rotacional dos ligantes asfálticos	34
Tabela 6 - Temperatura de mistura e compactação dos ligantes asfálticos	36
Tabela 7 - Parâmetros do ensaio MSCR.....	41
Tabela 8 - Resumo dos dados obtidos no trabalho.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB *Asphalt Binder*

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ADP Asfalto Diluído de Petróleo

AI Índice de Envelhecimento

ANP Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

AOCS *American Oil Chemists' Society*

ASTM *American Society for Testing and Materials*

CAP Cimento Asfáltico de Petróleo

CNT Conselho Nacional de Trânsito

DNIT Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes

DSR *Dynamic Shear Rheometer*

EAP Emulsão Asfáltica de Petróleo

JNR Compilância Não Recuperável

LEP Laboratório de Engenharia de Pavimentos

MSCR *Multiple Stress Creep Recovery*

MAM Misturas Asfálticas Mornas

NBR Norma Brasileira

PG *Performance Grade*

RAP *Reclaimed Asphalt Pavement*

RTFO *Rolling Thin-Film Oven*

TCU Tribunal de Contas da União

UFMG Universidade Federal de Campina Grande

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	15
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	15
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	15
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Ligantes asfálticos	16
2.2	Ligantes asfálticos modificados	17
2.3	Uso de óleos em ligantes asfálticos	18
2.4	Borra do óleo de soja	19
2.5	Misturas asfálticas mornas	20
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1	Materiais	22
<i>3.1.1</i>	<i>Borra do óleo de soja</i>	22
<i>3.1.2</i>	<i>Ligantes asfálticos</i>	24
3.2	Procedimento de teste	26
<i>3.2.1</i>	<i>Protocolo de secagem da borra de óleo de soja</i>	26
<i>3.2.2</i>	<i>Modificação do ligante asfáltico</i>	27
3.3	Testes experimentais	28
<i>3.3.1</i>	<i>Envelhecimento a curto prazo</i>	29
<i>3.3.2</i>	<i>Ensaio reológico</i>	29
<i>3.3.2.1</i>	<i>Viscosidade rotacional</i>	29
<i>3.3.2.2</i>	<i>Performance grade (PG)</i>	31
<i>3.3.2.3</i>	<i>Multiple stress creep and recovery (MSCR)</i>	32
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1	Viscosidade rotacional	34
4.2	Performance grade (pg)	36
4.3	Multiple stress creep and recovery (mscr)	41
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	45
5.1	Considerações finais	45
5.2	Sugestões para pesquisas futuras	45
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a matriz de transporte é composta por cinco diferentes modais, entretanto, o modal rodoviário se destaca ao longo dos últimos 30 anos como o mais utilizado (ILOS, 2014). Segundo Moreira (2014), o transporte rodoviário apresenta como principal característica a sua flexibilidade operacional com a facilidade da movimentação porta a porta, onde alguma restrição de acessibilidade ocorrerá somente se em seu trajeto observarem-se problemas de segurança ou de topografia.

Segundo a Confederação Nacional de Transporte (CNT), o pavimento no Brasil é projetado para durar entre 8 e 12 anos. Em geral, o pavimento das rodovias brasileiras sob gestão pública, apresenta problemas estruturais precocemente. Relatórios do TCU (Tribunal de Contas da União) de 2013 e DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes) de 2014, apontam que em alguns casos, os problemas começam a surgir apenas sete meses após a entrega da obra. 99% da malha rodoviária pavimentada é de pavimento flexível (asfalto), porém, apenas 12,3% das rodovias brasileiras são pavimentadas (211.486 km de 1.720.756 km). A densidade é muito baixa, em comparação com outros países.

O crescimento populacional, atrelado as fortes mudanças climáticas, são preocupações evidentes em todo o planeta. Com isso, estão surgindo novas tecnologias com o objetivo de diminuir os efeitos que os materiais utilizados na construção civil causam ao meio ambiente. Prowell e Merighi (2015) afirmam que através da busca pelo desenvolvimento sustentável, a indústria da pavimentação vem buscando novas tecnologias com intuito de contribuir com a redução da emissão de gases provenientes do aquecimento do cimento asfáltico de petróleo (CAP). A Europa desenvolveu a tecnologia de misturas asfálticas mornas (MAMs), permitindo a redução da temperatura de usinagem e aplicação da massa asfáltica, entre 20° e 50°C em comparação à mistura à quente, colaborando para menor emissão de gases causadores do efeito estufa.

Trabalhar com as misturas asfálticas em temperaturas elevadas produz emissão de gases que contribuem para o efeito estufa, bem como outras substâncias químicas poluentes que afetam a qualidade do ar. Este impacto ambiental negativo colabora para o aquecimento global. (RUBIO *et. al.* 2012). As MAMs (Misturas Asfálticas Mornas) podem ser obtidas por meio de modificadores como óleos naturais ou sintéticos, parafinas

e cera, possibilitando melhorias no ambiente de trabalho devido à redução de poluentes, além de atuar como agente rejuvenescedor tornando o ligante asfáltico mais flexível e resistente a trincas por fadiga (PALÁCIO E MAQUILÓN, 2013; SILVA, 2016).

Os benefícios diretos e imediatos das misturas asfálticas mornas são a redução de energia na produção da mistura, necessária para atingir altas temperaturas que permitam atingir a viscosidade ideal do CAP para envolver adequadamente os agregados, boa trabalhabilidade e fácil compactação. Quando se reduz a temperatura, em todas ou em pelo menos uma destas fases, sem perder as características técnicas, há redução de fumos e emissões, nas usinas e nas obras, além de menor envelhecimento do CAP, preservando suas características de flexibilidade por mais tempo (BUDNY, 2012).

Na atualidade, há diferentes tipos de aditivos para as misturas mornas no mercado, variando de produtos químicos e orgânicos, de asfalto a ceras orgânicas. (MERIGHI, 2017). Porém, segundo Stimilli (2017) cada tipo de aditivo, empregado na fabricação de misturas mornas, atua com base em mecanismos particulares que fornecem benefícios e desvantagens específicas.

Pesquisas recentes estudaram a influência da adição de óleos vegetais nas propriedades físicas e reológicas dos ligantes asfálticos. Os autores apontam, que apesar da adição do óleo comprometer a deformação permanente, e diminuir a recuperação elástica dos ligantes asfálticos, os mesmos também auxiliam no alívio de tensões das misturas asfálticas, e no melhor comportamento quanto à fadiga e maior resistência ao trincamento térmico. Além disso, enfatizam a redução do passivo ambiental gerado pela destinação adequada dos óleos pós-consumo (CHEN *et al.* 2014; AZAHAR *et al.* 2015; SUN *et al.* 2016; GUARIN *et al.*, 2016 AL-OMARI *et al.* 2018).

O aditivo utilizado nesta pesquisa, o óleo de soja, é extraído da semente da soja, e além de ser utilizado como fonte de alimento, com o desenvolvimento tecnológico, pode ser empregado como um biocombustível. A adição de óleos como agentes rejuvenescedores vem ganhando bastante destaque nos últimos anos, devido a sua viabilidade ambiental e suas propriedades químicas. (DEVUPALLI; KOTHANDARAMAN; SARANG, 2019; LI *et al.*, 2019; TAHERKHANI; NOORIAN, 2019; ZIARI *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2020a; XINGYU; RUIKUN; NAIPENG, 2020).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho analisou os efeitos da adição da borra do óleo de soja após processo de secagem no comportamento reológico do ligante asfáltico classificado com penetração 50/70 como redutor de viscosidade nos teores de 1%, 3% e 5% por peso do ligante.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar as propriedades do ligante asfáltico modificado com os teores propostos da borra do óleo de soja antes e depois do envelhecimento a curto prazo por meio de ensaios reológicos;
- Determinar as temperaturas de misturas e compactação dos ligantes asfálticos;
- Verificar a viabilidade da borra do óleo de soja seca como agente redutor de viscosidade para uso em misturas asfálticas mornas e recicladas;
- Avaliar qual porcentagem se mostrou mais eficaz como redutor de viscosidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico serão apresentados estudos bibliográficos relevantes para o desenvolvimento deste trabalho, abordando tópicos como: ligantes asfálticos, ligantes asfálticos modificados, uso de óleos em ligantes asfálticos, óleo de soja e misturas asfálticas mornas.

2.1 Ligantes asfálticos

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Segundo Balbo (2015), a estrutura do pavimento é concebida, em seu sentido puramente estrutural, para receber e transmitir esforços de maneira a aliviar as pressões sob as camadas inferiores, que geralmente são menos resistentes. Respeitando uma terminologia coerente, o pavimento possui as seguintes camadas: revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito, sendo este último, a fundação e parte integrante da estrutura.

Pamplona (2013), afirma que a utilização do ligante asfáltico em pavimentação se justifica por diversas razões, dentre elas: forte coesão dos agregados, permitindo uma flexibilidade controlável, durabilidade, resistência, baixa reatividade, impermeabilidade. Além de poder ser utilizado aquecido ou emulsionado, com ou sem presença de aditivos. O ligante asfáltico apresenta um comportamento fluido em altas temperaturas e/ou durante carregamento lento e torna-se semi-sólido e quebradiço em baixas temperaturas e/ou durante carregamento rápido, podendo causar deformação permanente, trinca por fadiga e por origem térmica no pavimento, limitando assim sua aplicação.

O ligante asfáltico é um material bastante complexo, que possui uma grande variedade de compostos orgânicos. Originado do petróleo, é um material impermeável a água e pouco reativo, visto que sofre um processo de envelhecimento por oxidação lenta, devido ao contato com o ar e a água, porque é formado por moléculas orgânicas e estas reagem com o oxigênio do meio ambiente (oxidação) proporcionando maior rigidez ao material. (SOBREIRO, 2014).

Segundo Lesueur (2009), o ligante asfáltico é constituído de hidrocarbonetos de massa molar e estrutura química diferentes. Em sua composição, estão presentes principalmente heteroátomos como enxofre (0 a 9%), nitrogênio (0 a 2%), e oxigênio (0 a 2%). De acordo com Bernucci *et al.* (2008), a composição química também varia com o tipo de fracionamento a que se submete o ligante asfáltico, sendo o método mais moderno atualmente empregado, normalizado pela ASTM D 4124:2001, aquele que separa as seguintes frações: saturados, nafteno-aromáticos, polar-aromáticos e asfaltenos. Na Europa, utiliza-se método similar conhecido como SARA (S de saturados, A de aromáticos, R de resinas e A de asfaltenos).

Os principais tipos de ligantes asfálticos existentes no mercado, são: cimento asfáltico de petróleo – CAP; asfalto diluído de petróleo – ADP e emulsões asfálticas de petróleo – EAP, sendo o primeiro, o mais utilizado. O cimento asfáltico de petróleo é obtido a partir da destilação fracionada do petróleo. No petróleo estima-se que a quantidade de asfalto está na faixa de 10 a 70% dependendo do tipo do petróleo. O processo de refinação do petróleo também depende do tipo do petróleo e do seu rendimento em asfalto, segundo IBP (1999).

Os CAPs são materiais aglutinantes, betuminosos, de cor escura, que são constituídos por misturas complexas de hidrocarbonetos de elevada massa molar (em torno de 93%), cujos principais componentes são o hidrogênio e o carbono, tendo em proporções pequenas, enxofre, nitrogênio e metais, como níquel e ferro (FAWCETT e McNALLY, 2000; VLACHOVICOVA *et al.*, 2007 apud ALENCAR, 2009). Segundo Lucena (2005), o CAP é o asfalto refinado para atender aos requisitos de pavimentação, aplicação industrial e finalidades especiais, representando de 5 a 6% em peso, das misturas asfálticas. Sua função primordial é agir como um aglomerante para os demais componentes da mistura, essencialmente agregados minerais.

2.2 Ligantes asfálticos modificados

Silva *et al.* (2018) relatam que por vários anos, o desempenho do ligante asfáltico convencional foi considerado aceitável. Porém, com as variações climáticas e conseqüentemente, o aumento do tráfego, tornou-se necessário o uso de materiais modificadores para melhorar as misturas asfálticas. Segundo Zhang *et al.* (2015), esses fenômenos meteorológicos, tem causado a deterioração prematura de pavimentos flexíveis construídos com ligantes asfálticos convencionais, tornando necessária a modificação destes a fim de melhorar as suas propriedades e desempenho.

Segundo Durand *et al.* (2012), a modificação de ligantes asfálticos busca alcançar alguns benefícios, tais como o aumento da durabilidade do pavimento e a otimização da manutenção. Porém, a adição de modificadores requer cuidado, visto que as unidades moleculares dos polímeros são maiores do que as maiores moléculas dos ligantes asfálticos, o que pode acarretar problemas de homogeneidade quando misturados. O CAP modificado é aquele que recebeu a adição de um agente modificador de origem natural, sintética ou polimérica. Mesmo que os ligantes convencionais, ou seja, sem qualquer modificação, sejam adequados para uso em pavimentos, alguns fatores contribuem progressivamente para a utilização desses modificadores. (SOARES *et al.*, 2002).

Guimarães (2018), cita que propriedades dos ligantes asfálticos têm sido constantemente melhoradas por aditivos poliméricos nos últimos anos. Os polímeros normalmente empregados na modificação incluem o estireno-butadieno-estireno (SBS), borracha de estireno-butadieno (SBR) etileno acetato de vinilo (EVA), dentre outros. As suas características de mistura em betume podem afetar significativamente as propriedades das misturas resultantes, além dos seus custos. Esse melhoramento nas propriedades físicas e reológicas pode ser uma consequência de possíveis ligações ou interações químicas do ligante com o polímero modificador, que resulta na melhoria do desempenho do ligante convencional, através da resistência aos problemas de afundamento por trilha de roda, trincamento térmico ou dano por fadiga.

2.3 Uso de óleos em ligantes asfálticos

Jain e Praddyuma (2016) citam que os agentes rejuvenescedores são recomendados constantemente para melhorar a composição química e reológica do ligante oxidado, proveniente do RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*). De acordo com Stimilli *et al.* (2017), o ligante asfáltico presente no RAP pode sofrer o processo de oxidação, e apresentar uma maior fragilidade e aumento da rigidez, em virtude das altas temperaturas durante a produção e exposição a longo prazo ao ar e à luz solar durante a vida útil.

Com o objetivo de realizar uma restauração das propriedades reológicas do ligante asfáltico envelhecido e a manutenção das propriedades de serviço da reciclagem de mistura asfáltica a quente, faz-se necessário um processo para rejuvenescer o ligante envelhecido presente no RAP (REYES-ORTIZ *et al.*, 2012). Por possuírem uma boa viabilidade ambiental, com uma destinação adequada para os resíduos, os estudos

voltados à incorporação de óleos como agentes rejuvenescedores vem ganhando bastante destaque devido às suas propriedades químicas, similares com as dos óleos virgens. (DEVULAPALLI; KOTHANDARAMAN; SARANG, 2019; LI *et al.*, 2019; TAHERKHANI; NOORIAN, 2019; ZHANG *et al.*, 2019; ZIARI *et al.*, 2019; XINGYU; RUIKUN; NAIPENG, 2020).

Segundo He *et al.* (2017), os bio-óleos são comumente aplicados na indústria de ligantes asfálticos, e podem ser classificados como: substituintes (teor de 100% de bio-óleos ao invés do ligante asfáltico), extensores (teor de 25% a 75% de substituição ao ligante asfáltico), e modificadores (teor abaixo de 10% em substituição ao ligante). Portugal (2016) realizou estudos com o intuito de determinar as características físico-químicas e as propriedades reológicas do óleo de soja e de milho, com uma avaliação do envelhecimento a curto prazo dos ligantes asfálticos modificados com os óleos estudados. E os ensaios de caracterização mostraram que os óleos de milho, novo ou residual, são menos viscosos e mais estáveis e degradáveis termicamente que os óleos de soja. Comprovou-se que o CAP 50/70 apresentou maior sensibilidade a adição dos óleos de soja e de milho, com variações significativas nas características de acordo com o aumento dos teores, o que interfere diretamente na diminuição das temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas. Embora as reduções das temperaturas terem sido aproximadamente 5-10°C, para a validação desta hipótese, faz-se necessário realizar ensaios físicos e mecânicos, com misturas produzidas por estes óleos. O autor concluiu que a utilização dos óleos de soja e de milho (novo e residual) é viável do ponto de vista ambiental, físico e reológico. Vale salientar que o óleo residual apresentou maiores benefícios ambientais, levando em consideração os malefícios e problemas que o descarte incorreto pode ocasionar ao meio-ambiente.

2.4 Borra do óleo de soja

A borra é o principal subproduto da indústria de refino de óleos vegetais, consiste praticamente em água, sais de sódio de ácidos graxos, triglicerídeos, fosfolipídeos, matéria insaponificável e produtos de degradação (MAG *et al.*, 1983; WOERFEL, 1995). Segundo a classificação das Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Norma Brasileira (NBR) 10004, a borra de soja é considerada um resíduo de Classe 1, ou seja, resíduos pertencentes a esta classe podem apresentar algum risco à saúde pública, devido as suas propriedades físico-químicas ou infectocontagiosas. Se manuseados ou dispostos de forma inadequada, podem provocar ou acentuar uma incidência de doenças e aumento

da mortalidade.

Da Fré (2009) afirma que sabões de sódio são formados durante a etapa de neutralização do refino químico, através da reação com o hidróxido de sódio, com o propósito de realizar a remoção dos ácidos graxos livres presentes no óleo. Vale salientar que também ocorre o arraste dos fosfolipídeos e de óleo neutro (triglicerídeos) pela borra, ocasionando com que a sua composição seja formada basicamente por: sabões (23%), água (50%), fosfolipídeos (10%), e o óleo neutro arrastado (17%) (ZAFANELLI, 2010).

Os ácidos graxos resultantes da acidulação da borra também podem ser utilizados no tratamento de minérios, que consiste basicamente em uma série de processos com o intuito de realizar uma separação das partículas minerais valiosas dos mineiras e ganga (partícula de minério que não são de interesse), e a obtenção final de um produto concentrado com um teor elevado e adequado do mineral desejado. Observou-se a capacidade de alterar a superfície das espécies minerais, revestindo seletivamente a superfície mineral de interesse, tornando-a hidrofóbica (ARAUJO *et al.*, 2016).

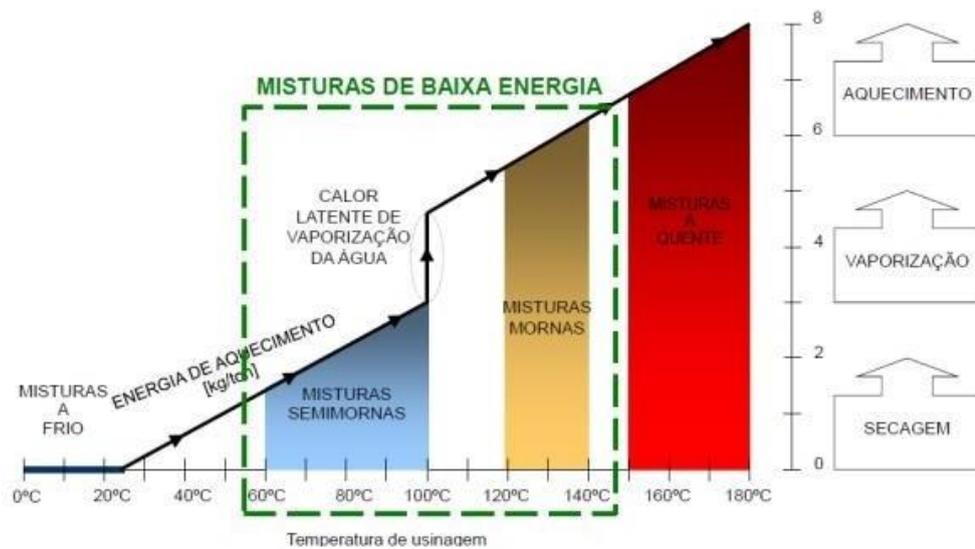
2.5 Misturas asfálticas mornas

Segundo Sales *et al.* (2015), no processo de fabricação de misturas asfálticas convencionais tanto o ligante asfáltico como os materiais granulares devem ser aquecidos a temperaturas elevadas em torno de 150°C a 200°C. Nesta faixa de temperatura, o ligante possui viscosidade capaz de encobrir os grãos do material granular e formar uma mistura homogênea. Para atingir tais temperaturas o processo requer um alto consumo de energia, que geralmente ocorre pela queima de combustíveis fósseis, que por consequência, liberam quantidade considerável de gases nocivos a atmosfera, contribuindo assim para o conhecido efeito estufa. Atualmente, há necessidade de diminuir, cada vez mais, os agentes causadores do efeito estufa e suas consequências ao meio ambiente.

As MAMs agrupam uma série de tecnologias reduzindo a viscosidade em temperaturas de 20 a 50°C mais baixas que a temperatura das misturas convencionais. Desta forma, há melhoria na trabalhabilidade nos processos de usinagem e compactação, diminuição da permeabilidade e do endurecimento do ligante e consequente melhoria no desempenho em termos de resistência a formação de trincas (OLIVEIRA, 2014; FEITOSA, 2015). Segundo os estudos de Motta (2011), se a redução da temperatura é ainda maior que 50°C ou mais, com as misturas sendo preparadas e aplicadas abaixo de 100°C, têm-se as chamadas misturas asfálticas semimornas (em inglês, *Half-Warm Mixes Asphalt* – HWMA).

Logo, as misturas podem ser classificadas quanto a sua temperatura em: misturas frias (temperatura ambiente), misturas semimornas (temperaturas entre 60°C e 100°C), misturas mornas (WMA) (temperaturas entre 100° a 140°C) e misturas quentes (HMA) (temperatura entre 150°C e 190°C) (RUBIO, 2011). Segundo D'Angelo (2008), as MAM proporcionam a redução da emissão de CO₂ e a diminuição no consumo de energia. Dados indicam que a utilização de MAMs pode reduzir entre 30% e 40% a quantidade de CO₂ e SO₂; 50% da quantidade de compostos orgânicos voláteis (VOCs); entre 10% e 30% de CO e entre 60% e 70% de NO, NO₂ E NO₃. Na Figura 1, é mostrado os tipos de misturas asfálticas, classificadas de acordo com a faixa de temperatura de usinagem e quantidade de combustível, utilizadas no processo de produção.

Figura 1: Classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas para usinagem (números aproximados)



Fonte: D'Angelo, 2008 – Adaptado CCR Nova Dutra

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico trata sobre os materiais utilizados neste estudo para a produção das amostras de ligante asfáltico modificado, bem como os procedimentos feitos para caracterizar o desempenho reológico do ligante asfáltico com a adição borra do óleo de soja após o processo de secagem. Os processos de modificação e caracterização do ligante asfáltico foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP, localizado na Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

3.1 Materiais

3.1.1 Borra do óleo de soja

Neste estudo, o agente modificador utilizado foi a borra do óleo de soja, derivado do processamento do refino do óleo de soja. A mesma foi obtida pela empresa IMCOPA, localizada no estado do Paraná, Brasil. A Figura 2 apresenta a borra do óleo de soja utilizada no processo.

Figura 2: Borra do óleo de soja



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

A IMCOPA disponibilizou a borra sem os dados característicos do material, logo foram realizados ensaios e procedimentos laboratoriais, com o intuito de caracterizar o material. Os ensaios foram realizados conformes as normas da *American Oil Chemists' Society* (AOCS) e procedimentos baseados em estudos realizados por Da Fré (2009). A Tabela 1 apresenta os resultados encontrados nos ensaios de caracterização da borra do

óleo de soja.

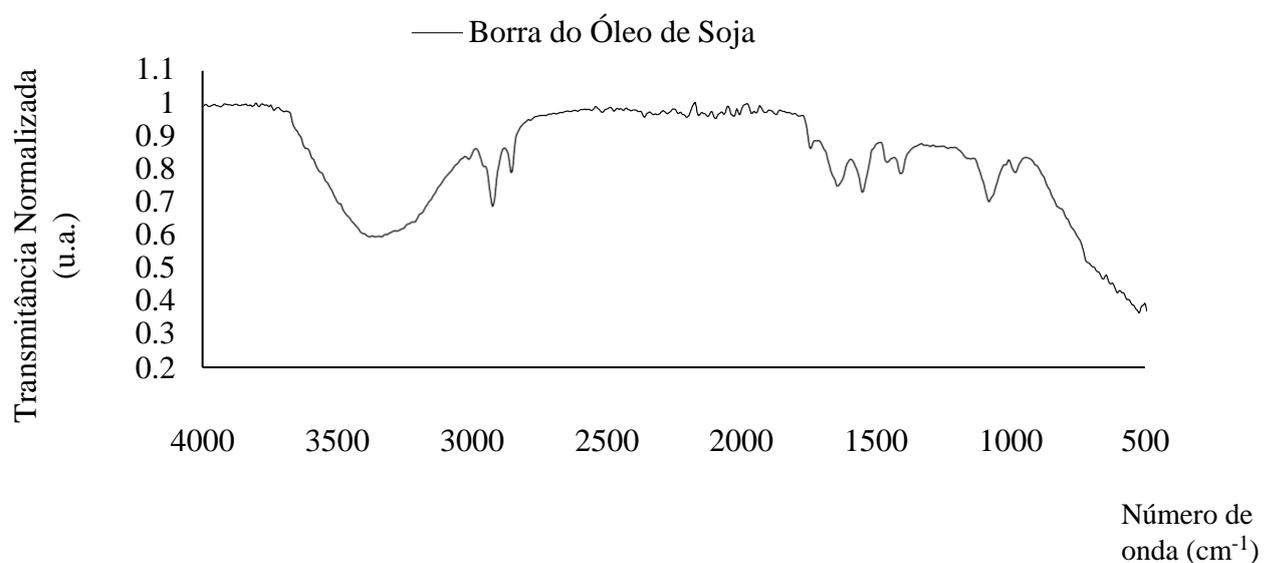
Tabela 1: Resultados da caracterização da borra do óleo de soja

ENSAIOS	RESULTADOS	NORMAS
Ácidos graxos livres em ácido oleico (%)	0,68	AOCS Ca 5a-40: 2017
Teor de ácidos graxos totais (%)	41,59	AOCS G 3-53: 2017
Teor de ácidos graxos oxidados (%)	1,22	AOCS G 3-53: 2017
Teor de matéria insaponificável (%)	0,87	AOCS Ca 6a-40: 2017
Teor de óleo neutro (%)	12,44	AOCS G5-40: 2017
pH a 25°C	9,96	AOCS G 7-56: 2017
Teor de umidade e voláteis (%)	41,85	AOCS Ca 2c-25: 2017

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Swern (1982) aponta que o teor de ácidos graxos totais na borra bruta ocorre dentro da faixa de 35% a 50%. O resultado obtido neste estudo foi de 41,59%, que se enquadra nos limites. O teor de umidade determinado foi alto, o que pode acarretar nos resultados do ligante após a sua modificação, já que mais de 40% da amostra da borra a ser incorporada ao ligante corresponde à umidade. O teste do pH permitiu verificar o grau de alcalinidade do material, que neste caso, apresentou-se como básico ou alcalino, pelo valor (9,96) ser acima de 7. A Figura 3 apresenta o espectro referente ao resultado do FTIR para a borra do óleo de soja.

Figura 3: FTIR da borra do óleo de soja



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

O teste do FTIR (ASTM D7653: 2018) foi realizado com o intuito de caracterizar quimicamente a amostra, identificando previamente os grupos funcionais presentes. Segundo Melo Neto (2022), o espectro obtido apresenta modos e combinações vibracionais de grupos funcionais dos ácidos graxos presentes na composição química da borra do óleo de soja, porém expõe as bandas de absorção na região de 3.010 cm^{-1} a 2.800 cm^{-1} , correspondentes às vibrações de deformação axial de ligações C-H de grupamentos metila (CH_3), metileno (CH_2) e das ligações duplas ($=\text{CH}$). As bandas que apresentam intensidade intermediária nos limites de 1.743 cm^{-1} a 1.404 cm^{-1} , correspondem a vibração de deformação axial do grupo carbonila ($\text{C}=\text{O}$), presente nos grupos ésteres constituintes dos triacilglicerídios. A presença de bandas de forte absorção na região de 1.080 cm^{-1} a 987 cm^{-1} , são atribuídas às vibrações de deformação axial da ligação C-O de ésteres constituintes dos triacilglicerídios. Logo, devido à presença dessas bandas que não estão presentes no ligante asfáltico, pode-se inferir que o material atue como um antioxidante.

3.1.2 Ligantes asfálticos

O ligante asfáltico utilizado neste estudo foi classificado com penetração 50/70 e temperatura máxima de PG de 64°C , cedido pela empresa Cordilheira, localizada no município de Campina Grande – PB. Esse ligante foi escolhido pelo fato da sua vasta utilização na Região Nordeste do Brasil. A sua caracterização foi realizada por meio de ensaios físicos empíricos e reológicos.

A Tabela 2 apresenta os resultados da caracterização do ligante asfáltico. Todos os ensaios reológicos realizados para o ligante asfáltico puro, denominado AB do termo em inglês Asphalt Binder, foram executados com as amostras de ligante asfáltico modificadas pela a borra do óleo de soja. Os ensaios de viscosidade rotacional e PG foram realizados com amostras do ligante asfáltico virgem e envelhecidas pelo procedimento de envelhecimento a curto prazo com a estufa de filme fino rotativa (Rolling Thin Over Test). Os ensaios de viscosidade rotacional foram realizados utilizando um viscosímetro rotacional tipo Brookfield e os ensaios de reologia em um reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) da série Discovery Hybrid Rheometer (DHR-1).

Tabela 2: Caracterização do ligante asfáltico puro (AB)

	Resultados	Normas	
	AB		
Penetração 0.1 mm (100g, 5s a 25°C)	58	ASTM D5/D5M: 2020	
Ponto de Amolecimento (°C)	52	ASTM D36/D36M – 14: 2020	
Viscosidade Rotacional (cP)	135 °C	ASTM D4402/D4402M: 2015	
	150 °C		
	177 °C		
Temperatura máxima de PG (°C)	64	ASTM D6373: 2021	
	RTFO	ASTM D2872: 2019	
Viscosidade Rotacional (cP)	135 °C	ASTM D4402/D4402M: 2015	
	150 °C		
	177 °C		
Temperatura máxima de PG (°C)	64	ASTM D6373: 2021	
MSCR	Jnr a 0.1 kPa	3.4	
	Jnr a 3.2 kPa	3.83	
	Percentual de recuperação a 0.1 kPa	5.03	ASTM D7405:2020
	Percentual de recuperação a 3.2 kPa	0.37	

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

3.2 Procedimento de teste

3.2.1 *Protocolo de secagem da borra do óleo de soja*

Melo Neto (2022) realizou estudos físicos empíricos e reológicos do ligante asfáltico modificado com a borra do óleo de soja, nos teores de 1%, 3% e 5%, na sua condição natural sem nenhum processo de tratamento. Conforme apresentado em seu trabalho e na presente pesquisa, a borra do óleo de soja apresentou um teor de umidade de aproximadamente 42%, equivalendo a quase metade da quantidade de borra adicionada ao ligante. Ou seja, se o autor afirmou que adicionou 1% de borra do óleo de soja, na verdade estaria adicionando 0.58% de borra propriamente dita, pois 0.42% seria equivalente à umidade presente na borra. Assim, a fim de investigar a influência da retirada de água da borra do óleo de soja nos efeitos reológicos do ligante asfáltico, realizou-se um protocolo de secagem no material, conforme apresentado nas Figuras 4 e 5. Esse protocolo foi realizado por 72 horas (3 dias) no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), seguindo os passos descritos:

- (1) Duas amostras foram colocadas e espalhadas em bandejas circulares cobertas por papel alumínio. As pesagens relacionadas à amostra 1 foram: 78,96 g da bandeja; 367,72 g da bandeja + borra do óleo de soja e 288,76 g de borra do óleo de soja. A amostra 2 apresentou as seguintes pesagens: 78,45 g da bandeja; 366,63 g da bandeja + borra do óleo de soja e 288,18 g de borra do óleo de soja.
- (2) As amostras foram colocadas em uma estufa a 65°C às 16 horas e 40 minutos do dia 15 de agosto de 2022. Após 17 horas realizou a pesagem das amostras (amostra 1 = 324,31 g; amostra 2 = 324,15 g); após 40 horas (amostra 1 = 293,07 g; amostra 2 = 294,54 g); após 43 horas (amostra 1 = 289,87 g; amostra 2 = 291,39 g); após 65 horas (amostra 1 = 273,29 g; amostra 2 = 275,24 g); após 68 horas (amostra 1 = 271,50 g; amostra 2 = 273,41 g); após 72 horas (amostra 1 = 269,55g; amostra 2 = 271,48 g). O protocolo foi finalizado no dia 18 de agosto de 2022.
- (3) O protocolo foi cessado após completar 72 horas de procedimento de secagem, pois foi percebido uma redução de aproximadamente 35% de umidade das amostras de borra do óleo de soja. A retirada total da umidade da borra do óleo de soja levaria um tempo ainda maior devido à temperatura utilizada no protocolo ser inferior à temperatura de ebulição da água (100°C). E como o experimento visa a aplicação para produção de ligantes asfálticos modificados para uso em misturas asfálticas à larga escala, seria inviável protocolos muito demorados na logística de produção de misturas asfálticas em usinas gravimétricas.

Figura 4: Estufa e amostra utilizadas no processo de secagem



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

Figura 5: Bandeja circular e as amostras antes e depois da secagem



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

3.2.2 Modificação do ligante asfáltico

A modificação do ligante asfáltico foi realizada a fim de investigar o comportamento reológico após a adição da borra do óleo de soja seca em teores distintos, sendo eles 1%, 3% e 5%. Os teores utilizados foram determinados por meio do estudo de Seidel e Haddock (2014) e Melo Neto (2022). No processo de mistura (ligante-

modificador), foi utilizado um agitador mecânico FISATOM, modelo 722D. O processo de modificação seguiu os seguintes passos:

- (1) O ligante asfáltico foi pré-aquecido em estufa a 135°C por aproximadamente 90 minutos, a fim de garantir a fluidez necessária para que a homogeneização seja realizada.
- (2) O ligante foi depositado em um béquer e colocado sobre o agitador mecânico, submetido a uma rotação de 600 rpm para garantir homogeneidade na distribuição da amostra.
- (3) Após atingir a temperatura de estabilização (140°C), os aditivos foram adicionados, proporcionalmente por peso do ligante puro, e as rotações foram aumentadas para 1.000 rpm, mantendo as amostras por 30 minutos para homogeneização da mistura, em teores de 1%, 3% e 5%.
- (4) O processo foi finalizado após a verificação visual da homogeneidade das amostras.

A Tabela 3 apresenta a descrição das amostras utilizadas na pesquisa e suas respectivas nomenclaturas. Logo após a obtenção dos ligantes asfálticos modificados, foi realizada a caracterização reológica, antes e após o envelhecimento Rolling Thin Film Over (RTFO) ASTM D2872:2019, por meio dos testes de Viscosidade Rotacional ASTM D4402:2015, Performance Grade (PG) ASTM D6373:2021, e Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) ASTM D7405:2020.

Tabela 3: Nomenclatura das amostras utilizadas neste estudo

AMOSTRAS	NOMENCLATURA
CAP 50/70	AB
AB + 1% da borra do óleo de soja	1%BSS
AB + 3% da borra do óleo de soja	3%BSS
AB + 5% da borra do óleo de soja	5%BSS

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

3.3 Testes experimentais

3.3.1 Envelhecimento a curto prazo

Esta simulação de envelhecimento a curto prazo nos ligantes asfálticos é, dentre os procedimentos laboratoriais de envelhecimento, uma das mais utilizadas. A norma ASTM D2872:2019 rege o ensaio, e trata de um condicionamento em estufa com amostras padronizadas de ligantes asfálticos dispostas em frascos de vidro e em uma prateleira vertical rotativa, que gira por 85 minutos à 163°C, o que causa a oxidação e volatilização de componentes leves, como acontece no processo de usinagem até a compactação in loco. Portanto, esse procedimento é executado para simular o efeito oxidativo que o ligante asfáltico sofre no processo de usinagem. A Figura 6 apresenta a estufa de filme rotativo utilizada no processo.

Figura 6: Estufa RTFO



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

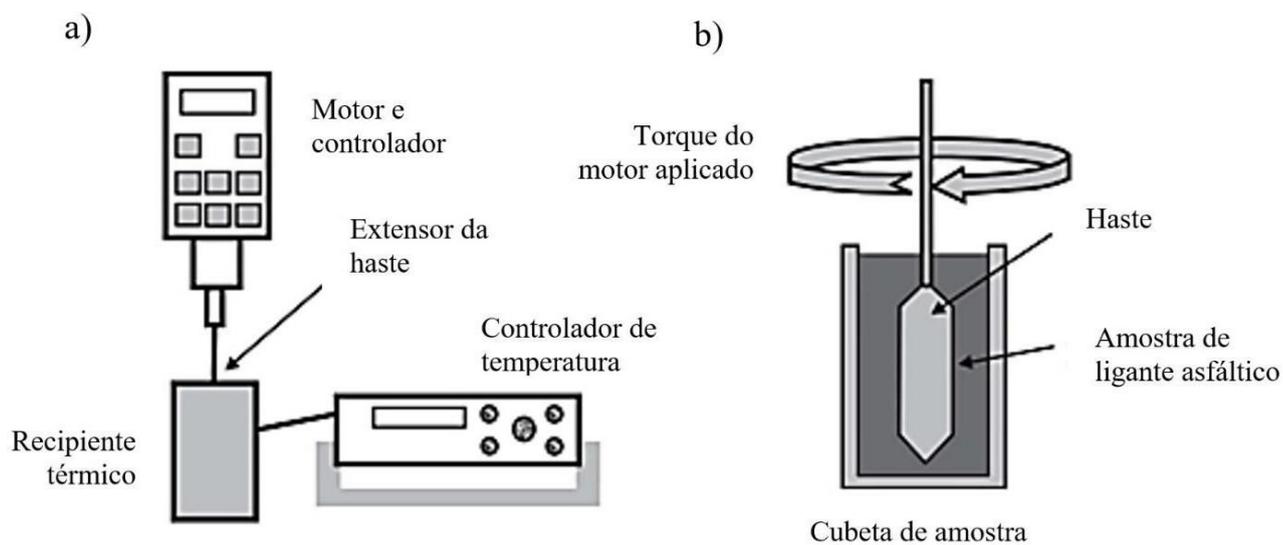
3.3.2 Ensaios reológicos

3.3.2.1 Viscosidade rotacional

Neste primeiro ensaio, também conhecido como Brookfield (nome dado ao viscosímetro utilizado no ensaio), a norma utilizada para a realização foi a ASTM D4402: 2015. Para executar o ensaio, a amostra do ligante asfáltico é fixada em um recipiente, que possui a temperatura controlada, posteriormente, o eixo com rotação e velocidade em controle, é colocado dentro do recipiente que contém a amostra. Após isso, a partir do valor aplicado de torque no eixo, pode-se calcular o valor da viscosidade rotacional. A Figura 7 apresenta

o esquema do equipamento e do eixo, utilizados no ensaio de viscosidade rotacional, enquanto a Figura 8 apresenta as amostras preparadas para o ensaio.

Figura 7: Arranjo dos materiais do ensaio de viscosidade rotacional: a) esboço do equipamento, b) esboço do eixo na amostra do ligante asfáltico



Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2008).

Figura 8: Amostras para o ensaio de viscosidade rotacional



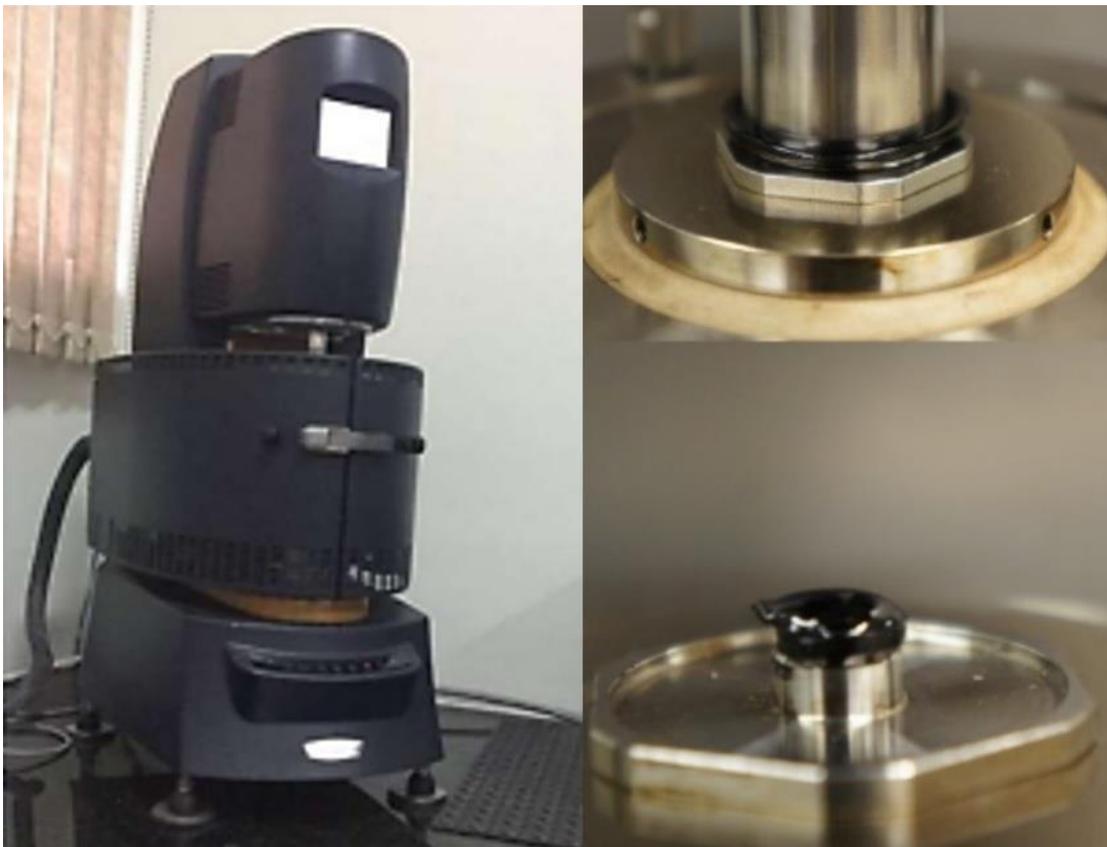
Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

3.3.2.2 Performance grade (pg)

Para este ensaio, a norma utilizada foi a ASTM D6373:2021. Este ensaio, por meio da utilização do reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), busca determinar a temperatura máxima e mínima em que o ligante, após sofrer deformação permanente, consegue manter a sua resistência. Nessa pesquisa, optou-se por investigar apenas a temperatura máxima de PG de cada ligante asfáltico, pois em regiões tropicais como o Brasil, dificilmente ocorrem temperaturas negativas.

Os ligantes mais viscosos, possuem tendência a apresentar valores maiores, em relação aos menos viscosos. O PG é um dado utilizado para mensurar a capacidade do modificador para ser utilizado como agente reciclador em misturas asfálticas recicladas. Ou seja, modificadores redutores de viscosidade que consigam reduzir o valor de PG de forma significativa tendem a ser utilizados como agente de reciclagem. A Figura 9 apresenta o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) utilizado nesse estudo.

Figura 9: Reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR)



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

Durante o ensaio, foi verificado o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ com a temperatura inicial de 46°C, sendo elevada para 52°C, 58°C e 64°C. Com os dados do ensaio das amostras antes e após o envelhecimento a curto prazo, possibilitou a determinação do índice de envelhecimento (AI), conforme a Equação (1):

$$AI = \frac{G^*/\text{sen}\delta_{\text{pósRTFO}}}{G^*/\text{sen}\delta_{\text{préRTFO}}} \quad \text{Equação (1)}$$

3.3.2.3 Multiple stress creep and recovery (mscr)

O ensaio foi conduzido pela norma ASTM D7405:2020. O procedimento é realizado no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) com amostras de ligante asfáltico envelhecidas no procedimento RTFO. Primeiramente, por meio da aplicação de 20 ciclos de carregamento, dos quais os 10 primeiros ciclos estavam sob as tensões de 0,1 kPa e os outros 10 ciclos, sob 3,2 kPa de tensão.

Após encontrar o percentual de recuperação elástica (%R), a compilância não-recuperável (Jnr) do ligante e a diferença percentual entre as compilâncias não-recuperáveis de 0,1 kPa e 3,2 kPa ($J_{nr\text{diff}}$). Válido salientar que o ensaio foi realizado na temperatura de PG do ligante asfáltico, com o objetivo de comparar as amostras do ligante puro e modificado.

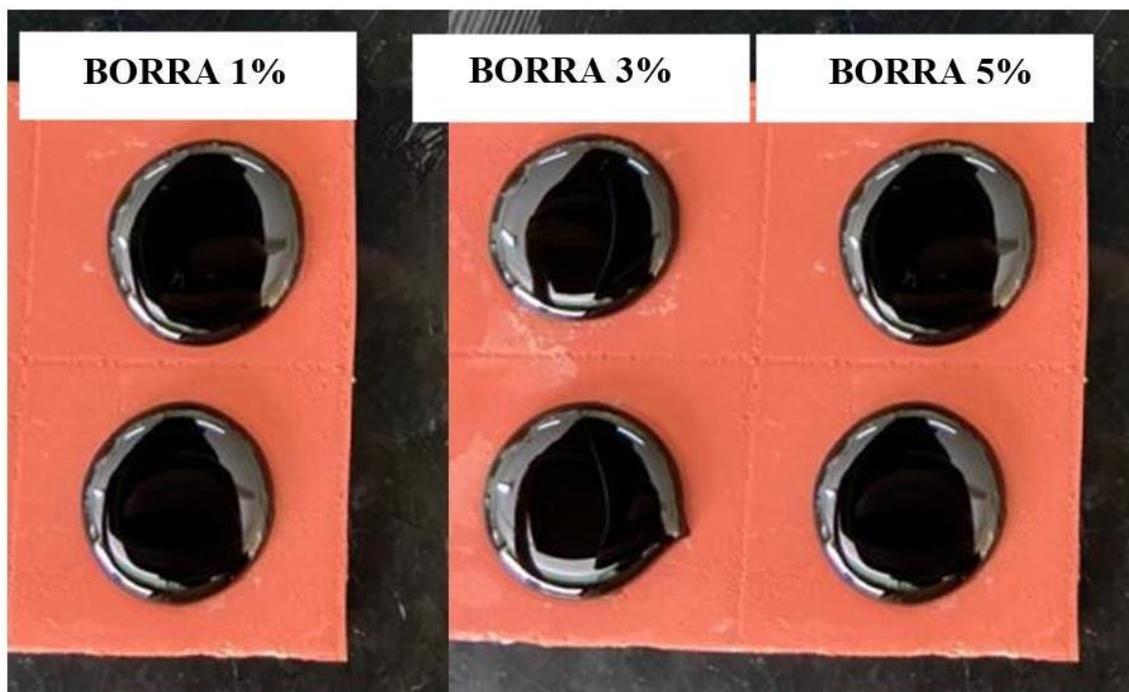
O teste aponta a suscetibilidade do ligante à deformação permanente. A norma AASHTO M320:2017 relaciona os valores obtidos para o Jnr a 3,2 kPa e a classe de tráfego a qual o ligante se encontra. Menores valores de Jnr a 3,2 kPa indica menor suscetibilidade do ligante asfáltico à deformação permanente, dados obtidos em ligantes asfálticos mais rígidos. A Tabela 4 foi utilizado para classificação dos ligantes asfálticos puro e modificados, conforme a norma AASHTO M320:2017 e a Figura 10 apresenta as amostras utilizadas no ensaio.

Tabela 4: Classificação de nível de carregamento do pavimento com base nos valores de Jnr

PROPRIEDADE	JNR (kPa^{-1})	TIPO DE TRÁFEGO	NÚMERO DE PASSADAS EM UM EIXO PADRÃO
Jnr a 3,2 kPa na temperatura máxima de PG	2,0 – 4,5	Padrão (S)	<10 milhões
	1,0 – 2,0	Pesado (H)	>10 milhões
	0,5 – 1,0	Muito pesado (V)	>30 milhões
	0 – 0,5	Extremamente pesado (E)	>100 milhões

Fonte: AASHTO M320 - Standard specification for performance-graded asphalt binder. Washington, 2017.

Figura 10: Amostras para o ensaio MSC



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este tópico aborda os resultados e discussões dos ensaios reológicos realizados na parte experimental do ligante asfáltico modificado com a adição da borra do óleo de soja, após o processo de secagem.

4.1 Viscosidade rotacional

O ensaio de viscosidade rotacional foi realizado nas amostras de ligante asfáltico puro e com a adição da borra do óleo de soja seca, antes e após o envelhecimento a curto prazo RTFO. Na Tabela 5 estão apresentados os dados médios do ensaio de viscosidade rotacional, antes e após RTFO.

Tabela 5: Dados de viscosidade rotacional dos ligantes asfálticos

Antes RTFO				
Temperatura (°C)	AB	1%BSS	3%BSS	5%BSS
135	401,00	404,43	398,53	457,50
142	284,00	286,20	277,31	298,55
150	198,00	200,34	193,65	201,27
165	120,00	109,80	107,90	106,56
177	73,00	72,24	71,06	74,17
Após RTFO				
Temperatura (°C)	AB	1%BSS	3%BSS	5%BSS
135	548,00	535,00	518,48	584,55
142	391,00	374,29	362,70	407,77
150	269,00	257,00	249,24	278,74
165	144,00	138,67	135,78	149,20
177	94,00	89,50	88,82	98,32

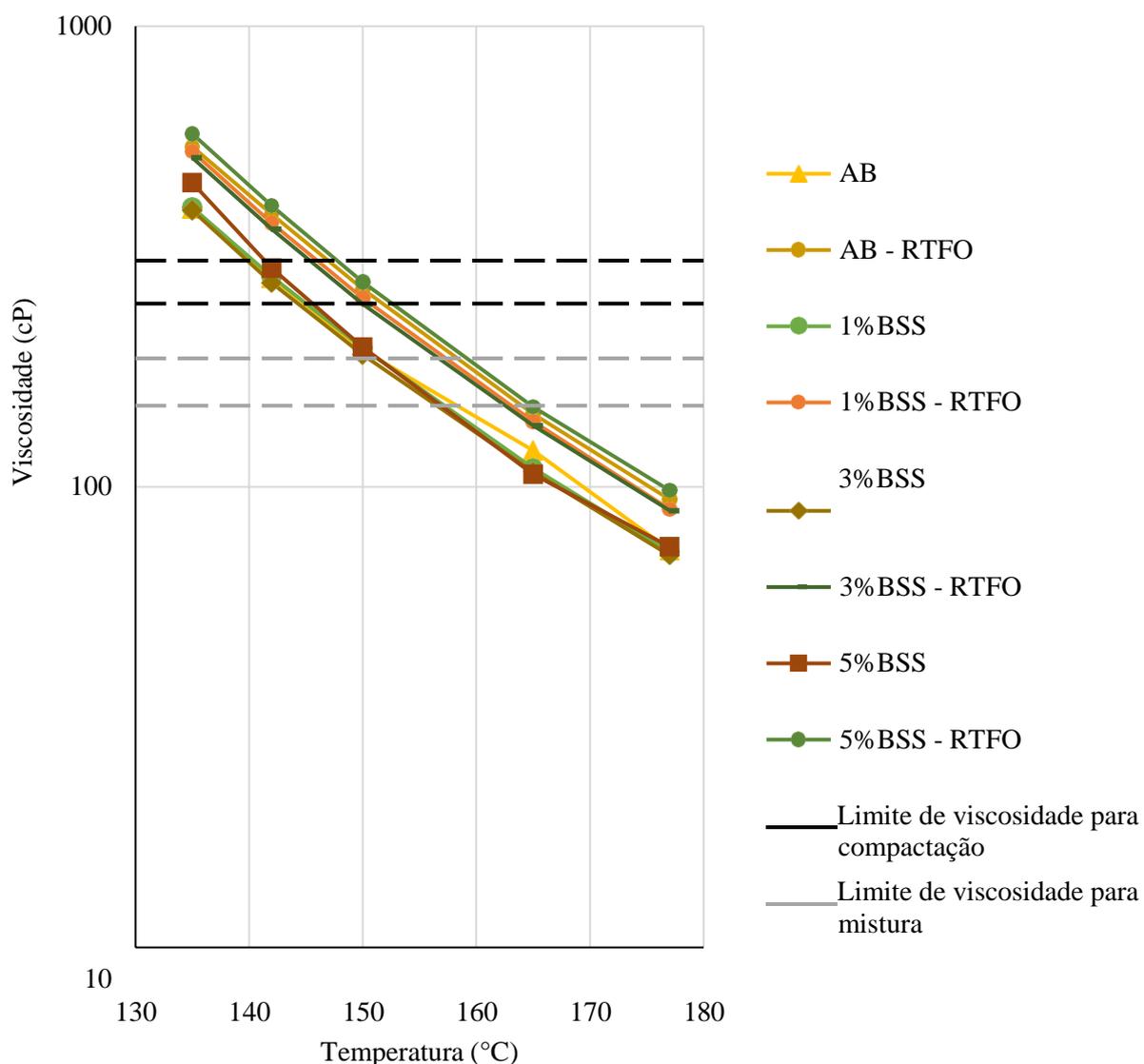
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Ao analisar os dados da Tabela 5, notou-se que houve um aumento da viscosidade para o ligante modificado com a borra seca em 1% e 5%, antes do RTFO. Contudo, à medida que se aumentou a temperatura do ensaio, verificou-se uma ligeira redução da viscosidade. Com o uso de 3% de borra seca, observou-se uma média de viscosidade

abaixo do ligante puro (AB), em todas as temperaturas testadas. O uso de 5% de borra seca acarretou um aumento da viscosidade em todas as temperaturas testadas.

Os valores obtidos nesse estudo são equivalentes aos apresentados por Melo Neto (2022). Contudo, o autor obteve redução de viscosidade para os três teores testados de borra do óleo de soja sem secagem (1%, 3% e 5%) nas temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C. Após RTFO, os resultados foram equivalentes aos obtidos nessa pesquisa. Assim, pode-se apontar que o processo de secagem não influenciou na viscosidade do ligante asfáltico. A Figura 11 apresenta o gráfico de viscosidade rotacional *versus* temperatura. Na produção de misturas asfálticas a temperatura de projeto do ligante deve ser de 0.17 ± 0.02 Pa.s para os ligantes asfálticos convencionais que são analisados no viscosímetro rotacional.

Figura 11: Gráfico viscosidade versus temperatura



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

A Tabela 6 apresenta as temperaturas de compactação e mistura das amostras analisadas a partir da análise gráfica da Figura 11. De acordo com os resultados, observou-se os valores para temperatura de mistura e compactação foram praticamente os mesmos obtidos para o ligante asfáltico puro. O ligante asfáltico que apresentou menores temperaturas foi 3%BSS, com uma pequena redução de 0,5°C (0,35%) nas temperaturas de mistura e compactação em relação ao ligante asfáltico puro. Dessa forma, pôde-se observar a não atuação da borra do óleo de soja seca como redutor de viscosidade do ligante asfáltico.

Tabela 6: Temperatura de mistura e compactação dos ligantes asfálticos

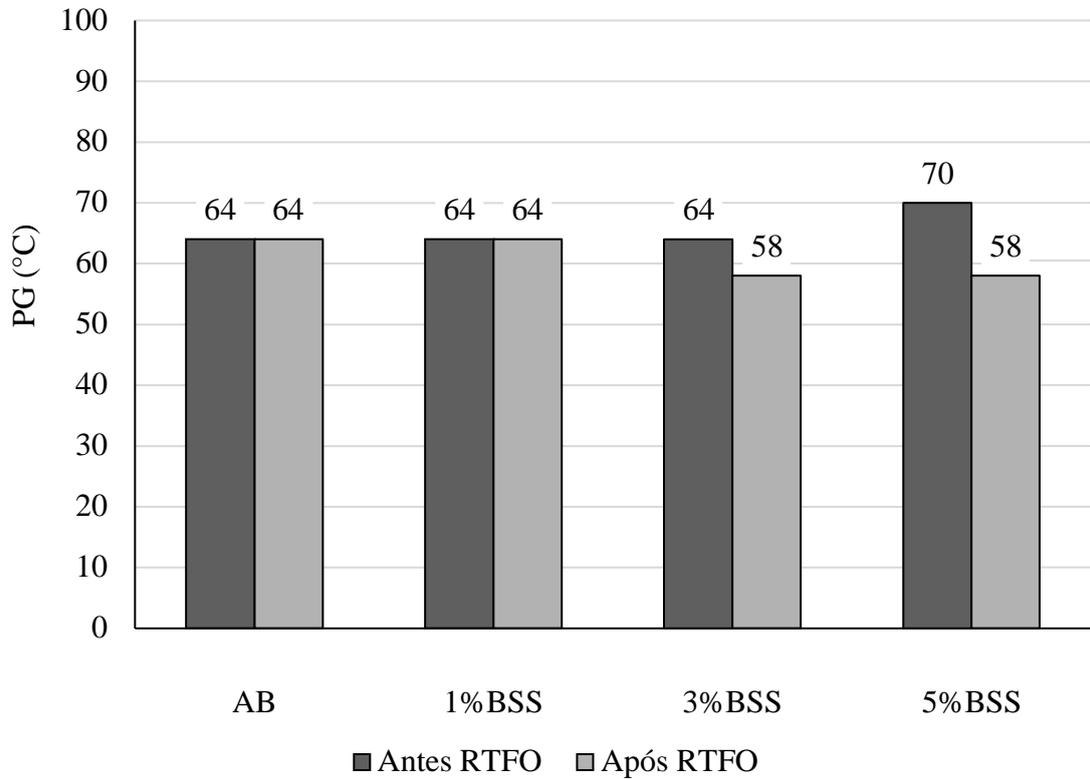
Antes RFTO				
Amostra	Intervalo da temperatura de compactação (°C)	Temperatura de compactação (°C)	Intervalo da temperatura de mistura (°C)	Temperatura de mistura (°C)
AB	140 - 145	142,5	150 - 158	154
1%BSS	140 - 145	142,5	150 - 157	153,5
3%BSS	140 - 144	142	150 - 157	153,5
5%BSS	142 - 146	144	152 - 157	154,5

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

4.2 Performance grade (pg)

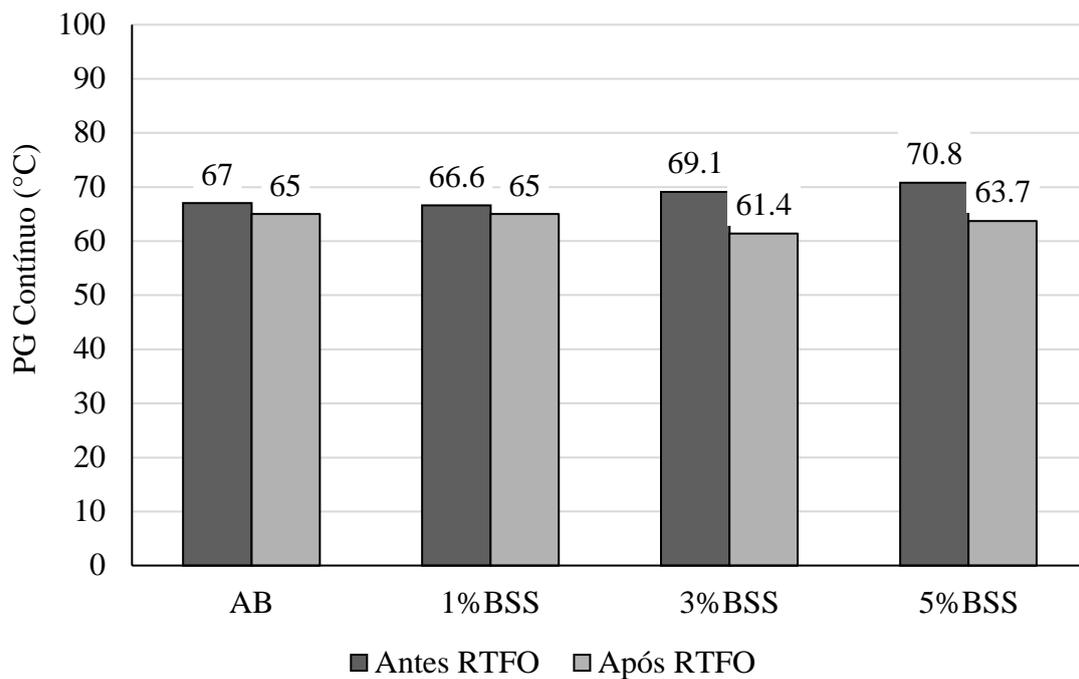
Sabe-se que o ensaio de PG determina a faixa de temperatura máxima e mínima da utilização, no entanto, foi dispensado a realização do ensaio para a determinação da temperatura mínima de PG, pelo fato da não ocorrência de temperaturas negativas no país, e pelo clima tropical do mesmo. As Figuras 12 e 13 apresentam os resultados das temperaturas de PG e PG contínuo antes e após o envelhecimento a curto prazo, respectivamente.

Figura 12: Grau de desempenho dos ligantes asfálticos puro e modificado (PG)



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Figura 13: Grau de desempenho dos ligantes asfálticos puro e modificado (PG contínuo)



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

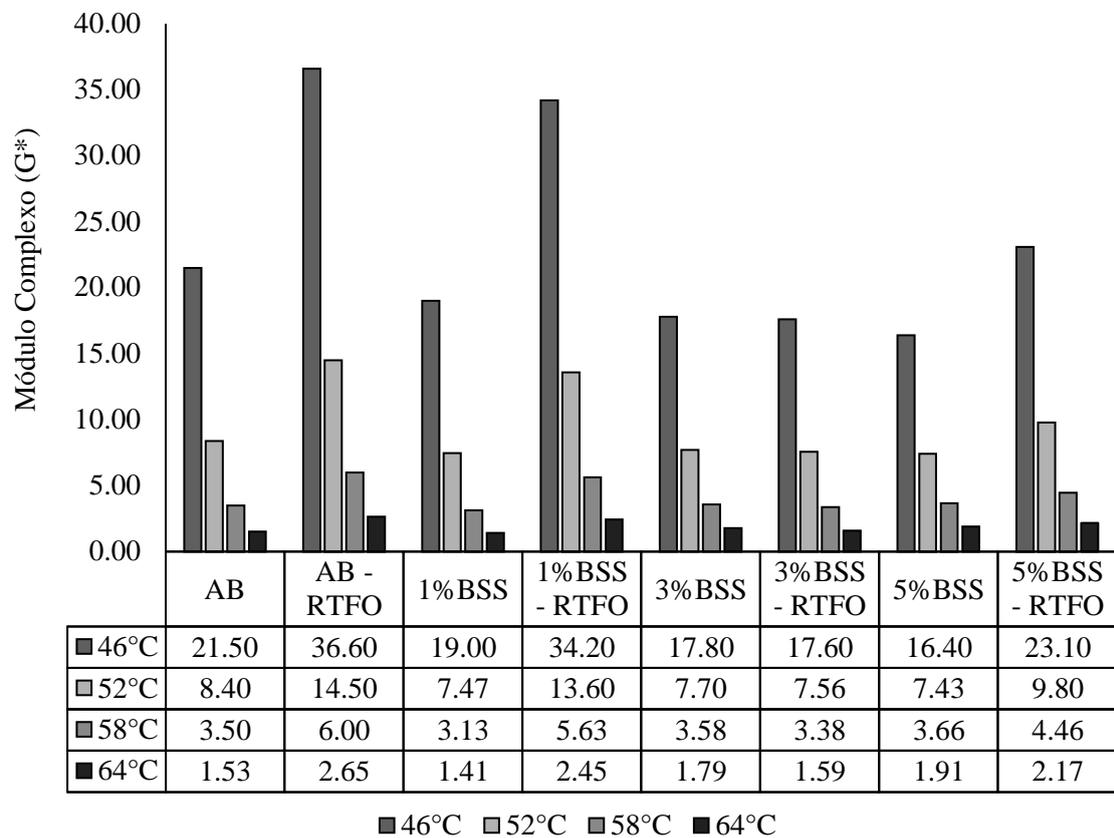
A partir dos dados apresentados nas Figuras 12, verifica-se que a amostra com a adição da borra do óleo de soja seca se manteve constante o valor de PG com o uso de 1% (64°C). Porém, a adição de 3% e 5% acarretou diminuição do PG após o ensaio de envelhecimento a curto prazo (RTFO), passando de 64°C para 58°C. A amostra 5%BSS apresentou aumento antes do RTFO, passando de 64°C para 70°C, com uma amplitude de 6°C. Melo Neto (2022) obteve valores idênticos para as amostras 1%BSS e 3%BSS, antes e após RTFO, com o uso da borra do óleo de soja sem secagem. A divergência foi em relação ao dado de 5%BSS, onde o autor obteve antes do RTFO o valor de 64°C, e nesse estudo o valor foi de 70°C, indicando aumento de rigidez do ligante asfáltico. Esses dados corroboram com as conclusões obtidas no ensaio de viscosidade rotacional, em que o processo de secagem não interferiu na ação da borra do óleo de soja no ligante asfáltico, apresentando-se irrelevante.

Na Figura 13 são observados os valores de PG contínuo para as amostras testadas. Os dados apontam o ganho de rigidez do ligante asfáltico após a adição da borra do óleo de soja, valores acima dos apresentados por Melo Neto (2022). A amostra 1%BSS apresentou aumento de 0,90%, 3%BSS aumento de 7,97%, e 5%BSS aumento de 10,63%; todas antes RTFO no PG contínuo. A borra do óleo de soja seca é inviável para uso como agente reciclador para misturas asfálticas recicladas devido ao aumento no valor de PG.

A Figura 14 apresenta os dados do parâmetro Módulo Complexo (G^*) das amostras em função da temperatura. Notou-se comportamento semelhante em todas as amostras testadas, redução do módulo complexo à medida que a temperatura de ensaio aumentou. Isso já era esperado, pois o ligante asfáltico é suscetível à mudança de temperatura, ou seja, à medida que se aumenta a temperatura sua viscosidade diminui devido à viscoelasticidade. Os dados obtidos para todas as amostras foram equivalentes em todas as temperaturas do ensaio.

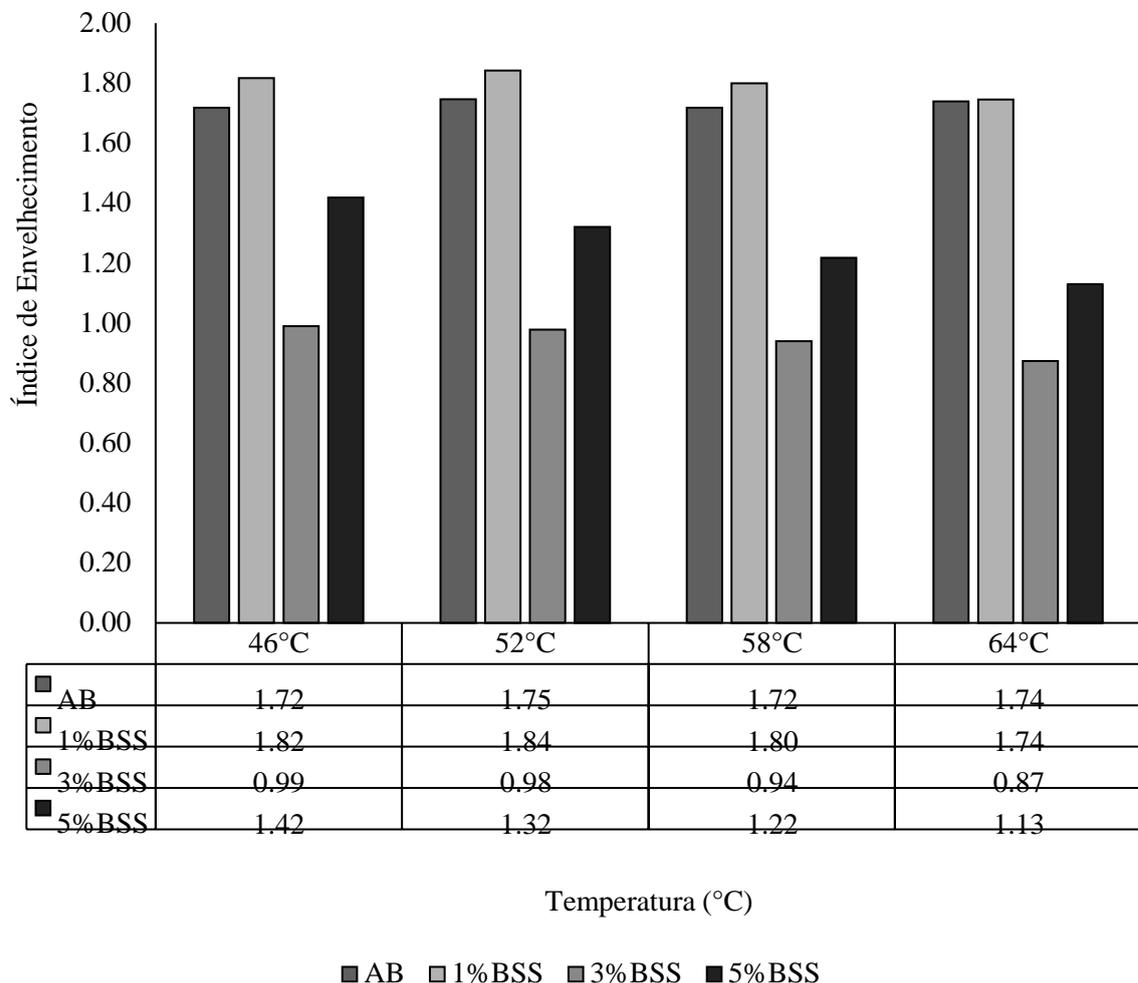
Contudo, observou-se redução do valor de G^* para as amostras modificadas, o que não era esperado devido essas amostras apresentarem maiores valores de PG. Essa inconsistência nos dados pode ser reflexo de uma hipótese levantada na etapa de análises de dados, a não homogeneidade da mistura ligante-modificador, ocasionando resultados não representativos.

Figura 14: Valores do parâmetro Módulo Complexo (G^*) em função da temperatura antes e após o RTFO



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Melo Neto (2022) salienta que após o envelhecimento a curto prazo, nota-se que há um acréscimo no valor do módulo complexo de todas as amostras devido ao processo oxidativo que as amostras ficam submetidas na estufa de filme rotativo. A Figura 15 apresenta os resultados do ensaio de índice de envelhecimento (AI), obtidos por meio da relação entre os parâmetros $G^*/\text{sen}\delta$ das amostras antes e após o ensaio de RTFO para cada temperatura de aferição.

Figura 15: Índice de envelhecimento dos ligantes asfálticos

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

A adição da borra do óleo de soja seca nos teores de 3% e 5% acarretou redução do índice de envelhecimento em todas as temperaturas testadas, em relação ao ligante asfáltico puro. Esse comportamento era esperado pois à medida que o ligante asfáltico fica mais rígido pela menos suscetível à perda da fração leve (aromática) do ligante asfáltico. A amostra 1% BSS apresentou maior índice de envelhecimento em relação às demais amostras analisadas. A maior redução do índice de envelhecimento foi observada na amostra 3%BSS com diminuição de 42,44%, 44%, 45,35% e 50% para as temperaturas de 46°C, 52°C, 58°C e 64°C, respectivamente, em relação ao ligante asfáltico puro (AB).

4.3 Multiple stress creep and recovery (mscr)

O desenvolvimento deste ensaio proporciona a análise da taxa percentual de recuperação (%R) por meios dos dados de elasticidade, da compliância não-recuperável (Jnr – apresenta dados de suscetibilidade ao acúmulo de deformação permanente, valores menores indicam que o ligante é menos suscetível e mais rígido) e a diferença percentual entre as compliâncias não-recuperáveis (Jnr,diff – que fornece dados à sensibilidade ao aumento da tensão). A Tabela 7 apresenta os dados obtidos no ensaio MSCR.

Tabela 7: Parâmetros do ensaio MSCR

Amostra	Temperatura de ensaio (°C)	Percentual de recuperação (%)		Compliância não recuperável Jnr (kPa ⁻¹)		Jnr, diff (%)
		0.1 kPa	3.2 kPa	0.1 kPa	3.2 kPa	
AB	64	5.03	0.37	3.40	3.83	12.68
1%BSS		1.62	0.28	3.82	4.10	7.21
3%BSS		0.96	0.30	4.22	4.59	8.87
5%BSS		6.18	0.58	4.02	4.99	24.21
3%BSS	58	8.77	1.39	1.74	2.02	15.55
5%BSS		9.79	1.94	1.63	2.02	23.75

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

A partir dos dados apresentados na Tabela 7, pode-se apontar que a incorporação da borra do óleo de soja seca ocasionou aumento nos valores de Jnr a 3,2 kPa, indicando redução da rigidez e suscetibilidade do ligante asfáltico à deformação permanente para a temperatura de ensaio de 64°C. Esse dado é incoerente com os valores observados no ensaio de viscosidade rotacional e performance grade (PG) que apontaram ganho de rigidez ao ligante asfáltico. Entretanto, vale ressaltar que a temperatura do ensaio de 64°C é acima da temperatura de PG após RTFO para as amostras 3%BSS e 5%BSS, ou seja, o ligante asfáltico submetido a uma temperatura maior a qual ele suporta (58°C) ocasiona numa redução exagerada da sua consistência.

Visto isso, o ensaio foi realizado na temperatura de PG (58°C) dos ligantes asfálticos modificados (3%BSS e 5%BSS). Conforme apresentados na Tabela 7, os valores de J_{nr} a 3,2 kPa para essas amostras foram inferiores ao do ligante asfáltico puro (AB), indicando que as amostras são mais rígidas e são menos suscetíveis à deformação permanente quando submetidas a temperaturas de até 58°C. Contudo, o ligante asfáltico puro resiste a temperaturas mais elevadas (64°C). Com base na Tabela 4 apresentada no tópico 3.3.2.3 desse trabalho, os ligantes asfálticos foram classificados quanto nível de carregamento do pavimento.

O ligante asfáltico puro (AB) foi classificado para uso em rodovias de nível de tráfego padrão (S) pois o J_{nr} a 3,2 kPa se encontra dentro do intervalo de 2,0 kPa⁻¹ a 4,5 kPa⁻¹. Assim como a amostra 1%BSS com valor de J_{nr} a 3,2 kPa de 4,10 kPa⁻¹ se enquadrando na mesma classificação. Porém, as amostras 3%BSS e 5%BSS foram inviáveis para uso em rodovias, pois seus valores a 64°C ficaram acima do limite máximo adotado pela norma AASHTO M320:2017 de 4,5 kPa⁻¹. As amostras 3%BSS e 5%BSS podem ser utilizadas em rodovias de tráfego padrão ou até mesmo tráfego pesado, quando a região não for submetida a temperaturas acima de 58°C, pois os valores de J_{nr} a 3,2 kPa foram de 2,02 kPa⁻¹, aproximadamente 2,0 kPa⁻¹.

Outro parâmetro importante do ensaio MSCR é o $J_{nr,diff}$, que é a medida da diferença entre o J_{nr} a 0.1 kPa e a 3.2 kPa, expresso em porcentagem. Os valores de $J_{nr,diff}$ para os ligantes asfálticos puro e modificados têm a função de mostrar a sensibilidade dos materiais ao aumento dos níveis de tensão e deve permanecer abaixo de 75%, conforme AASTHO M320:2017. Portanto, na faixa de temperatura estudada, observa-se que tanto o ligante asfáltico puro quanto os modificados por borra do óleo de soja seca (BSS) apresentaram valores inferiores ao limite de 75%, evidenciando que os materiais são adequados para utilização nessas faixas de temperatura. A Tabela 8 apresenta o resumo dos dados obtidos nos testes reológicos para as quatro amostras ensaiadas.

Tabela 8: Resumo dos dados obtidos no trabalho

Resultados						
		AB	1%BSS	3%BSS	5%BSS	
Viscosidade Rotacional (cP) Antes RTFO	135 °C	401,00	404,43	398,53 x	457,50	
	142 °C	284,00	286,20	277,31 x	298,55	
	150 °C	198,00	200,34	193,65 x	201,27	
	165 °C	120,00	109,80	107,90	106,56 x	
	177 °C	73,00	72,24	71,06 x	74,17	
Viscosidade Rotacional (cP) Após RTFO	135 °C	548,00	535,00	518,48 x	584,55	
	142 °C	391,00	374,29	362,70 x	407,77	
	150 °C	269,00	257,00	249,24 x	278,74	
	165 °C	144,00	138,67	135,78 x	149,20	
	177 °C	94,00	89,50	88,82 x	98,32	
Temperatura de compactação (°C)		142,5	142,5	142 x	144	
Temperatura de mistura (°C)		154	153,5 x	153,5 x	154,5	
Performance Grade (°C) antes RTFO		64 x	64 x	64 x	70	
Performance Grade (°C) após RTFO		64	64	58 x	58 x	
Performance Grade Contínuo (°C) antes RTFO		67 x	66,6	69,1	70,8	
Performance Grade Contínuo (°C) após RTFO		65	65	61,4 x	63,7	
Módulo Complexo (G*) antes RTFO	46 °C	21,5	19	17,8	16,4 x	
	52 °C	8,4	7,47	7,7	7,43 x	
	58 °C	3,5	3,13 x	3,58	3,66	
	64 °C	1,53	1,41 x	1,79	1,91	
Módulo Complexo (G*) após RTFO	46 °C	36,6	34,2	17,6 x	23,1	
	52 °C	14,5	13,6	7,56 x	9,80	
	58 °C	6	5,63	3,38 x	4,46	
	64 °C	2,65	2,45	1,59 x	2,17	
Índice de Envelhecimento (AI)	46 °C	1,72 x	1,75	1,72 x	1,74	
	52 °C	1,82	1,84	1,80	1,74 x	
	58 °C	0,99	0,98	0,94	0,87 x	
	64 °C	1,42	1,32	1,22	1,13 x	
MSCR Jnr a 0,1 kPa		64 °C	3,4	3,82	4,22 x	4,02
MSCR Jnr a 3,2 kPa		64 °C	3,83	4,10	4,59	4,99 x

x = Melhor desempenho dentre as amostras testadas.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Após a análise geral dos testes reológicos realizados, foi possível identificar maior destaque para a amostra de ligante asfáltico modificado com 3% de borra de óleo de soja seca. Esse mesmo resultado foi observado por Melo Neto (2022) ao analisar o uso da

borra do óleo de soja *in natura* nesses mesmos teores propostos. Outro ponto observado foi que a redução de viscosidade e rigidez obtido com a borra do óleo de soja seca foi insignificante em relação ao ligante asfáltico puro, pois a redução nas temperaturas de trabalho (mistura e compactação) quase não existiu. Assim, pode-se apontar que o uso da borra do óleo de soja após processo de secagem não proporciona redução da rigidez ao ligante asfáltico e não permite uso do RAP em misturas asfálticas recicladas. Um dos critérios utilizados para viabilizar o modificador como agente rejuvenescedor para misturas asfálticas recicladas é a redução do PG em relação ao ligante asfáltico puro, resultado não obtido nessa pesquisa.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste tópico serão apresentadas as conclusões obtidas por meio desta pesquisa, além de sugestões para pesquisar futuras, envolvendo o mesmo objeto de estudo.

5.1 Considerações finais

A avaliação reológica do ligante asfáltico modificado com a borra do óleo de soja seca permitiu apontar algumas conclusões:

- (1) As amostras de ligantes asfálticos modificados pela borra do óleo de soja seca em todos os teores testados apresentaram valores de viscosidade equivalentes ao do ligante puro, assim como as temperaturas de mistura e compactação.
- (2) A adição da borra do óleo de soja seca acarretou redução no índice de envelhecimento nos teores de 3% e 5% e aumento no teor de 1%.
- (3) As amostras de ligante puro e 1%BSS se apresentaram menos suscetíveis ao efeito de deformação permanente, sendo classificadas para tráfego padrão. Contudo, as amostras 3%BSS e 5%BSS se apresentaram mais suscetíveis à deformação permanente e inviáveis para uso em rodovias submetidas a temperaturas superiores a 58°C.
- (4) A borra do óleo de soja seca não proporcionou redução da temperatura de PG, inviabilizando seu uso como agente rejuvenescedor para misturas asfálticas recicladas.

Desse modo, o aditivo utilizado não apresentou ser um material viável, após processo de secagem, pois não permitiu reduzir as temperaturas de trabalho (mistura e compactação) proporcionando misturas asfálticas mornas. Ademais, não reduziu a temperatura de PG e se torna inviável para misturas recicladas. A hipótese levantada de que a retirada da umidade presente na borra melhoraria sua atuação no ligante asfáltico foi rejeitada.

5.2 Sugestões para pesquisa futuras

Tendo como objetivo o desenvolvimento de uma pesquisa mais ampla sobre o desenvolvimento da aplicação de resíduos oleosos vegetais como redutores de viscosidade, fica proposto as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- (1) Analisar quimicamente a borra do óleo de soja seca por meio do FTIR.

- (2) Investigar o uso da borra de outros óleos vegetais como palma, canola, girassol como modificador do ligante asfáltico e comparar os dados obtidos com a borra do óleo de soja *in natura* e seca nos mesmos teores testados.

REFERÊNCIAS

AASHTO M 332. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test, 2014.

ALVARENGA, H. Matriz de transportes do Brasil à espera dos investimentos. Ilos, 2020. Disponível em: <https://www.ilos.com.br/web/matriz-de-transportes-do-brasil-a-espera-dos-investimentos>.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. **AASHTO M 320**: Standard specification for performance-graded asphalt binder. Washington, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4402M**: 2015: Standar Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevater Temperatures Using a Rotational Viscometer. Estados Unidos, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 7405**: 2020: Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. Estados Unidos, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2872**: 2019: Standard Test Method for Effect of Heat and Air os a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Over Test). Estados Unidos, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D36M - 14**: 2020: Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). Estados Unidos, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5M**: 2020: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. Estados Unidos, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6373**: 2021: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. Estados Unidos, 2021.

ARAÚJO, A. M.; ADERALDO, M. B. B.; FREITAS, A. G. A.; MALVEIRA, J. Q.; RIOS, M. A.S. **Borra ácida do processamento do óleo de soja: processos reacionais e caracterizações**. In: XIV ENEE Amb Fórum Latino Americano de Engenharia e Sustentabilidade, Brasília, 2016

BALBO, J.T., **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projetos e restauração. 2007.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para Engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRAS. 2008.

BUDNY, J. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas.** 2012. M. Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BUDNY, J., ARAGÃO, F. T. S., MOTTA, L. M. G., FRITZEN, M. A., ZUBARAN, M. Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Mornas com Ligante Espumado. 41^a Reunião Anual de Pavimentação, Fortaleza, Brasil. 2012

CERATTI, J. A. P, NÚÑEZ. W. P. Estudo Laboratorial de Comportamento à Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Mornas. Relatório Final. CONCEPA Free Way e LAPAV/UFRGS. 2008.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileiro – grãos: Sétimo levantamento, abril 2022 – safra 2021/2022. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2022.

CUNHA, M.C., GOUVEIA, L.T., FERNANDES JUNIOR, J.L., MOTTA, L.M.G. **Influência dos agregados sobre propriedades mecânicas e volumétricas de misturas asfálticas: análise do método Bailey.** XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, 2004.

DA FRÉ, N. C. **Obtenção de ácidos graxos a partir da acidulação de borra de neutralização de óleo de soja.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DEVULAPALLI, L.; KOTHANDARAMAN, S.; SARANG, G. Evaluation of rejuvenator's effectiveness on the reclaimed asphalt pavement incorporated stone matrix asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 909–919, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ES 303/97:** Especificação de serviço. Pavimentação – base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1997.

DURAND, G.; GUEIT, C.; MARTIN, H: Assessment of bitumens for emulsions and modified binders: characterization by gel permeation chromatography. In: 5th EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, Istanbul, 2012.

FAWCETT, A.H., MCNALLY, T. (2001) Studies on Blends of Acetate and Acrylic Functional Polymers with Bitumen. *Macromolecular Materials and Engineering*, 286, 126-137. [http://dx.doi.org/10.1002/1439-2054\(20010201\)286:2<126::AID-MAME126>3.0.CO;2-X](http://dx.doi.org/10.1002/1439-2054(20010201)286:2<126::AID-MAME126>3.0.CO;2-X)

GUIMARÃES, E, M, SOUZA, O,R,M: **Ligantes asfálticos modificados com resíduos: uma revisão de literatura,** (2018). Recuperado de <https://eventos.ufpr.br/stpr/1stpr/paper/view/3158>

HE, M., TU, C., CAO, D.W., CHEN, Y.J. Comparative analysis of bio-binder properties derived from different sources. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 20, p. 792-800, 2017.

JAHANBAKHSH, H.; KARIMI, M.M.; NASERI, H.; NEJAD, F.M. Sustainable asphalt concrete containing high reclaimed asphalt pavements and recycling agents: performance assessment, cost analysis, and environmental impact. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, 118837, 2020.

LOPERA PALACIO, C. H. y CÓRDOBA MAQUILÓN, J. E. (2013) «Diseño de mezcla asfáltica tibia a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma», *DYNA*, 80(179), pp. 99–108. Disponible en:
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/28196> (Accedido: 4diciembre2022).

LESUEUR, D. The Colloidal Structure of Bitumen: Consequences on the Rheology and on the Mechanisms of Bitumen Modification. **Advances in Colloid and Interface Science** (2009).

LUCENA, M. C. C. **Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros**. 2005. Tese (Doutorado em Química Inorgânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

MAG, T. K.; GREEN, D. H.; KWONG, A. T. Continuous acidulation of soapstock and recovery of acid oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. Champaign, 1983.

MELO NETO, O. M. **Viabilidade de misturas asfálticas recicladas com ácido graxo da borra do óleo de soja**. (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

MELO NETO, O. M., Silva, I. M., Lucena, L. C. F. L., Lucena, L. F. L., Mendonça, A. M. G. D., Lima, R. K. B.: Viability of recycled asphalt mixtures with soybean oil sludge fatty acid. *Constr. Build. Mater.* 349 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128728>

MERIGHI, C. F. **Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu**. 201 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2014.

MOREIRA, L.A.M., JUNIOR, F. M., TOLOI, C.M.: **O transporte rodoviário no Brasil esuas deficiências**. (2018).

ONOFRE, F. C., CASTELO BRANCO, V. T. F., SOARES, J. B., & Faxina, A. L. Avaliação do efeito de ligantes asfálticos modificados na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas.

DENSAS. *TRANSPORTES*, 21(3) (2013)., 14–21.
<https://doi.org/10.4237/transportes.v21i3.685>

PAMPLONA, F. T., Efeito da adição de ácido polifosfórico em ligantes asfálticos de diferentes fontes. São Carlos, 2013.

PORTUGAL, A. C. X. **Avaliação reológica de cimentos asfálticos de petróleo modificados com óleo de soja e de milho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

PORTUGAL, A.C.X., LUCENA, L.C.F.L., LUCENA, A.E.F.L., COSTA, D.B., LIMA, K.A., “**Rheological properties of asphalt binders prepared with maize oil**”, *Construction and Building Materials*, v. 152, pp. 1015-1026, 2017.

PRADYUMNA, T. A.; JAIN, P. H. Use of RAP stabilized by hot mix recycling agents in bituminous road construction. **Transportation Research Procedia**, v. 17, p. 460-467, 2016.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C.; FRANK, B. Warm mix asphalt: Best practices. National Asphalt pavement association – NAPA. Quality Improvement Publication 125. Lanham, 2012.

REYES-ORTIZ, O.; BERARDINELLI, E.; ALVAREZ, A. E.; CARVAJAL-MUÑOZ, J. S.; FUENTES, L. G. Evaluation of hot mix asphalt mixtures with replacement of aggregates by reclaimed asphalt pavement (RAP) material. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 53, p. 379-388, 2012.

RUBIO, C. R.; MARTÍNEZ, G.; BAENA, L.; MORENO, F. Warm mix asphalt: an overview. **Journal of Cleaner Production**, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.053>.

SALES, P. M. **Avaliação das Características Físicas e Mecânicas de Misturas Asfálticas Modificadas com Adição do CCBIT**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

SEIDEL, J. C.; HADDOCK, J. E. Rheological characterization of asphalt binders modified with soybean fatty acids. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 324-332, 2014.

SILVA, G. A. M.; RÓS, P. C. M.; SOUZA, L. T. A.; COSTA, A. P. O.; CASTRO, H. F. Physico-chemical, spectroscopical and thermal characterization of biodiesel obtained by enzymatic route as a tool to select the most efficient immobilized lipase. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 29, n. 1, p. 39-47, 2012

SOBREIRO, P, F., Efeito da adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico deligantes asfálticos puros e modificados com copolímero SBS (Tese de Doutorado na Escola de Engenharia de São Carlos) São Carlos, 2014.

STIMILLI, A.; VIRGILI, A; CANESTRARI, F. Warm recycling of flexible pavements: Effectiveness of Warm Mix Asphalt additives on modified bitumen and mixture performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 156, p. 911-922, 2017.

SWERN, D. **Refining and Bleaching**. In: SWERN, D. Bailey's Industrial Oil and Fat Products. 4. ed. New York: J. Wiley and Sons, v. 2, p. 253-314, 1982.

ZAFANELLI, F. A. F **Avaliação de pré-viabilidade técnica e econômica de produção debiodiesel a partir de borra de refino de óleo de soja**. Dissertação (Mestrado em Processos Químicos). Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2010.