



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII – ARARUNA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL

EVANDRO LUCIO CANDIDO DA COSTA

**ANÁLISE FÍSICA EMPÍRICA E REOLÓGICA DE LIGANTE ASFÁLTICO
MODIFICADO COM BORRA DO ÓLEO DE SOJA**

ARARUNA – PB

2022

EVANDRO LUCIO CANDIDO DA COSTA

**ANÁLISE FÍSICA EMPÍRICA E REOLÓGICA DE LIGANTE ASFÁLTICO
MODIFICADO COM BORRA DO ÓLEO DE SOJA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Estadual da
Paraíba, com requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Pavimentação.

Orientador: Prof. Me. Osires de Medeiros
Melo Neto

Coorientadora: Profa. Me. Albaniza Maria da
Silva Lopes

ARARUNA – PB

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.

C837a Costa, Evandro Lucio Candido da.
Análise física empírica e reológica de ligante asfáltico modificado com borra do óleo de soja [manuscrito] / Evandro Lucio Candido da Costa. - 2022.
49 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."
"Coorientação: Profa. Ma. Albaniza Maria da Silva Lopes ,
Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."
1. Asfalto. 2. Reologia. 3. Óleo de Soja. I. Título
21. ed. CDD 625.85

EVANDRO LUCIO CANDIDO DA COSTA

ANÁLISE FÍSICA EMPÍRICA E REOLÓGICA DE LIGANTE ASFÁLTICO
MODIFICADO COM BORRA DO ÓLEO DE SOJA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Estadual da
Paraíba, com requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Pavimentação.

Aprovado em: 28/07/2022.

BANCA EXAMINADORA

Osires de Medeiros Melo Neto

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

Albaniza Maria da Silva Lopes

Profa. Me. Albaniza Maria da Silva Lopes (Coorientadora)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro

Profa. Dra. Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Yáscara Maia Araújo de Brito

Profa. Dra. Yáscara Maia Araújo de Brito
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Aos meus pais, pelo amor, carinho, dedicação,
companheirismo e incentivo, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus e à Nossa Senhora, por me dar a perseverança necessária e conforto nos momentos difíceis.

Aos meus pais, pelo incentivo, por não medirem esforços para me possibilitar o acesso a educação que eles não tiveram a oportunidade de ter, por vibrar com intensidade cada conquista minha, por me ensinarem a prezar a educação e o conhecimento e por me ensinarem a ver beleza na simplicidade.

Aos meus tios Adegilson Mendes e Luciene Mendes, por se fazerem presentes de alguma forma em toda a minha vida, por me ensinarem valores e por toda dedicação em possibilitar, junto aos meus pais, a minha educação.

À minha professora do ensino fundamental Renata Nielle, por todos os ensinamentos, por me apresentar o curso de Engenharia Civil e sempre confiar na minha capacidade.

Ao professor e orientador Osires de Medeiros Melo Neto, pelos ensinamentos em sala de aula, pelo respeito, pela paciência, pela confiança e por prontamente me ajudar sempre que o procurei.

À professora e coorientadora Albaniza Maria da Silva Lopes, por me aceitar como seu orientando e possibilitar a realização dessa pesquisa.

Aos professores do curso de Engenharia Civil da UEPB, em especial, Alan Cavalcanti, Clesio Lima, Karina Fernandes, Luísa Eduarda e Maria Adriana, que contribuíram ao longo de 5 anos por meio das disciplinas e pela oportunidade de ter aprendido com cada um a me tornar um ser humano melhor.

Aos meus irmãos da graduação, Adson Oliveira, Alberto de Oliveira, Automar Guédes e Thales Mamede, por cada momento de alegria, por cada conselho, por cada auxílio nos momentos difíceis, por cada palavra, pela dádiva de ter convivido esses 5 anos com cada um. Vocês me deram forças para continuar no curso e conseguiram deixar minha jornada acadêmica mais completa.

Aos meus colegas, Alex Guedes, Eryclapton Gomes e Maria Ana, por me acolherem nessa caminhada e pelos momentos de alegria.

Aos meus amigos de longa data, Ana Lorena, Arthur Gomes, Eduarda Lima, Jorge Gabriel, Karynna Mirelle, Thaynara Cavalcante e Thomaz Cavalcante, por estarem comigo desde sempre, por se fazerem presente mesmo à distância, por me aconselharem, por tudo.

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

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

À Cordilheira pelo ligante asfáltico cedido para utilização nos ensaios.

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

*“Cada sonho que você deixa pra trás, é um
pedaço do seu futuro que deixa de existir.”*

- Steve Jobs

RESUMO

O alto crescimento da população, a ação humana na alta busca por matérias-primas e o modelo de produção de bens e consumo culmina em um grande impacto ambiental. O uso do pavimento asfáltico reciclável (RAP) na produção de misturas asfálticas recicladas tem crescido, visando a escassez de materiais virgens. Entretanto, a utilização de teores acima de 30% de RAP demanda o uso de agentes rejuvenescedores a fim de evitar o trincamento prematuro da mistura asfáltica. A utilização de agentes rejuvenescedores como aditivos faz possível a restauração parcial das propriedades envelhecidas do ligante recuperado. Assim, pesquisas que busquem analisar a utilização de subprodutos e resíduos industriais se fazem necessárias para encontrar soluções que atuem em uma economia circular. Esta pesquisa buscou avaliar o uso da borra do óleo de soja (BOS) nos teores de 7% e 9% como modificador redutor de viscosidade e seu potencial para uso em misturas asfálticas recicladas. A metodologia realizada compreendeu a caracterização do ligante asfáltico por meio dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, grau de performance (PG); antes e após o envelhecimento a curto prazo (RTFO), e recuperação de fluência de estresse múltiplo (MSCR). Os resultados mostraram que o elevado teor de umidade presente na BOS pode ter oxidado o ligante asfáltico no processo de modificação e RTFO. O valor da penetração foi elevado e o ponto de amolecimento reduzido. O agente modificador não foi eficaz na redução da temperatura de PG, mas as temperaturas de mistura e compactação foram reduzidas. A amostra com 9% de BOS acarretou redução na suscetibilidade à deformação permanente. Assim, a BOS se mostrou um material viável, em relação ao seu aspecto sustentável e ao seu baixo custo de aquisição, como redutor de temperaturas de compactação e mistura, porém, não demonstrou um efeito rejuvenescedor para uso em misturas asfálticas recicladas.

Palavras-Chave: Pavimento Asfáltico Reciclável. Resíduos. Reologia. RAP. Óleo de Soja.

ABSTRACT

The high growth of the population, the human action in the high search for raw materials and the model of production of goods and consumption culminates in a great environmental impact. The use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in the production of recycled asphalt mixtures has grown, aiming at the scarcity of virgin materials. However, the use of levels above 30% of RAP demands the use of rejuvenating agents in order to avoid premature cracking of the asphalt mixture. The use of rejuvenating agents as additives makes it possible to partially restore the aged properties of the recovered binder. Thus, research that seeks to analyze the use of by-products and industrial waste is necessary to find solutions that work in a circular economy. This research sought to evaluate the use of soybean oil sludge (BOS) at levels of 7% and 9% as a viscosity-reducing modifier and its potential for use in recycled asphalt mixtures. The methodology carried out comprised the characterization of the asphalt binder through penetration tests, softening point, rotational viscosity, performance grade (PG); before and after short-term aging (*Rolling Thin-Film Oven* - RTFO), and Multiple Stress Creep Recovery (MSCR). The results showed that the high moisture content present in the BOS may have oxidized the asphalt binder in the modification process and RTFO. The penetration value was high and the softening point was reduced. The modifying agent was not effective in reducing the temperature of PG, but the mixing and compaction temperatures were reduced. The sample with 9% BOS caused a reduction in the susceptibility to permanent deformation. Thus, BOS mixture proved to be a viable material, in its sustainable acquisition cost, as temperature and appearance temperature reducers, while not affecting a rejuvenating but rejuvenating effect for use in recycled asphalt mixtures.

Keywords: Reclaimed Asphalt Pavement. Waste. Rheology. RAP. Soybean Oil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produtos fabricados no processamento industrial do óleo de soja.....	19
Figura 2 – Fluxograma geral do programa experimental	23
Figura 3 – Borra do óleo de soja	24
Figura 4 - Amostras de ligante asfáltico utilizadas no ensaio de penetração.....	28
Figura 5 – Esquema básico do ensaio de penetração	28
Figura 6 - Detalhe esquemático do anel e bola de aço e aparato utilizado no ensaio de ponto de amolecimento.....	30
Figura 7 - Esquema dos materiais do ensaio de viscosidade rotacional: a) esquema do equipamento, b) esquema do eixo na amostra de asfalto.....	31
Figura 8 - Reômetro de Cisalhamento Dinâmico	31
Figura 9 - Gráfico de viscosidade <i>versus</i> temperatura.....	37
Figura 10 - Resultados de PG da amostra pura e das amostras modificadas: a) PG, b) PG contínuo.....	39
Figura 11 - Valores do parâmetro Módulo Complexo (G^*) em função da temperatura antes e após RTFO.....	40
Figura 12 - Índice de envelhecimento (AI) das amostras de ligante asfáltico	41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Nomenclaturas das amostras utilizadas na pesquisa.....	26
--	-----------

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da caracterização da borra do óleo de soja	25
Tabela 2 - Resultados da variação de massa das amostras após RTFO.....	33
Tabela 3 - Resultados do ensaio de penetração 0,1 mm (100g, 5s a 25°C).....	35
Tabela 4 - Resultados do ensaio de ponto de amolecimento.....	36
Tabela 5 - Resultados do ensaio de viscosidade rotacional.....	37
Tabela 6 - Temperaturas de compactação e de mistura das amostras.....	38
Tabela 7 - Resultados do ensaio de Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)	42
Tabela 8 - Resumo dos Resultados.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AOCS	<i>American Oil Chemists' Society</i>
BOS	Borra do Óleo de Soja
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>
IA	Índice de Envelhecimento
Jnr	Compilância Não Recuperável
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
MSCR	<i>Multiple Stress Creep and Recovery</i>
PG	<i>Performance Grade</i>
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RTFO	<i>Rolling Thin-Film Oven</i>
SUPERPAVE	<i>SUperior PERforming Asphalt PAVEments</i>
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	16
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	16
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Conceitos Iniciais	17
2.1.1	<i>Ligantes asfálticos</i>	17
2.1.2	<i>Ligantes asfálticos modificados</i>	17
2.1.3	<i>Uso de óleos em ligantes asfálticos</i>	18
2.1.4	<i>Borra do óleo de soja</i>	19
2.1.5	<i>Misturas asfálticas recicladas</i>	20
2.2	Ponderações	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	Materiais	24
3.1.1	<i>Borra do óleo de soja</i>	24
3.1.2	<i>Ligante asfáltico</i>	25
3.2	Procedimentos de teste	26
3.2.1	<i>Modificação do ligante asfáltico</i>	26
3.2.2	<i>Envelhecimento a curto prazo</i>	27
3.2.3	<i>Ensaio físicos empíricos</i>	27
3.2.4	ENSAIOS REOLÓGICOS	30
4	RESULTADOS	33
4.1	Envelhecimento a curto prazo	33
4.2	Análise física empírica do ligante asfáltico	34
4.2.1	<i>Penetração</i>	34
4.2.2	<i>Ponto de amolecimento</i>	35
4.3	Análise reológica do ligante asfáltico	36
4.3.1	<i>Viscosidade rotacional</i>	36
4.3.2	<i>Performance Grade (PG)</i>	38
4.3.3	<i>Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)</i>	41
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	45
5.1	Considerações finais	45
5.2	Sugestões para pesquisas futuras	46

1 INTRODUÇÃO

A ação humana, o crescimento populacional e o modelo de produção de bens e consumo da população resultam em vários problemas ambientais. Diante do aumento da preocupação com o meio ambiente e a busca pela sustentabilidade, se faz necessário a procura por formas, materiais e produtos capazes de causar o menor impacto possível ao meio ambiente (CAI et al., 2019)

O setor da pavimentação asfáltica é responsável pela emissão de gases-estufa para a atmosfera advindos principalmente das altas temperaturas de compactação e mistura e por isso, buscam-se maneiras de diminuir os impactos dessas emissões (PORTUGAL et al., 2017).

Assim, novas pesquisas vêm sendo realizadas para aumentar a durabilidade e qualidade dos pavimentos asfálticos, levando em consideração que no Brasil, o modal mais utilizado como meio de transporte é o modal rodoviário, sendo que cerca de 95% do total das estradas são pavimentadas com revestimento asfáltico que têm uma vida útil de projeto de dez a vinte anos. Quando comparados aos pavimentos rígidos, possuem um investimento inicial mais baixo, porém tem a necessidade de manutenções contínuas e de fácil reparação (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Apesar de apresentarem um horizonte de projeto de até vinte anos, nos primeiros anos de vida de serviço do pavimento começam a surgir alguns defeitos, como deformações permanentes e trincas por fadiga, podendo vir a reduzir a vida útil desses pavimentos de vinte para cinco a dez anos. Essa redução da vida útil ocorre devido ao peso, ao aumento na quantidade de veículos e o número de eixos dos veículos comerciais. Sendo assim, esses pavimentos necessitam de reparo, manutenção e reconstrução (LEAL, 2013).

Para a execução dos pavimentos asfálticos são necessárias grandes quantidades de materiais não renováveis. Dessa forma, a busca das indústrias por materiais alternativos para a execução desses pavimentos tem crescido. Um deles é o *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) que é formado pelos resíduos de asfalto fresado, concebido em grandes quantidades nas obras de recuperação de pavimentos. A vasta utilização do RAP se dá pelo fato de que ele possui grande potencial de reciclagem, proporciona redução de custos quando utilizado como agregado e permite a circularidade ambiental (SANTOS; LEANDRO, 2017).

Porém, para realizar a reciclagem do material fresado, requer-se a recuperação da mistura asfáltica envelhecida por meio do incremento de agentes rejuvenescedores, que

possuem a finalidade de repor as resinas e os compostos aromáticos para reestabelecer as propriedades originais do ligante, atuando como amaciadores do ligante oxidado e rígido existente no RAP, tornando-o mais resistente ao trincamento prematuro por fadiga (SILVA; FARIAS, 2020).

No processo de dosagem de misturas asfálticas recicladas são aplicados *blending charts*. Esse método pode ser utilizado em três situações, quando se quer determinar o grau do ligante virgem quando se conhece o *Performance Grade* (PG) e o teor de ligante do RAP na mistura; quando se pretende estabelecer o grau dos ligantes misturados, nas situações em que os valores do grau do ligante e do teor de ligante do RAP são fixos; e quando visa-se designar o teor do ligante do RAP que pode ser utilizado quando um grau determinado de ligante virgem deve ser usado e o PG final dos ligantes misturados são conhecidos (SUZUKI, 2019).

A soja é a líder na produção nacional de grãos e é a base para a produção do óleo de soja. A produção de óleos em geral, origina três produtos principais, o condensado proveniente da desodorização, as gomas geradas na degomagem e as borras formadas na etapa de neutralização. Essa borra é constituída de sais de sódio de ácidos graxos, água, triglicerídeos, matéria insaponificável, fosfolipídios e produtos de degradação do óleo (DA FRÉ, 2009).

No Brasil durante o mês de abril de 2022 produziu-se cerca de 122.400 mil toneladas de soja, sendo a maior produção na região centro-oeste do país com 64.275 mil toneladas. Ainda, apenas 6% desse total representa a produção da borra do óleo de soja nas indústrias. (PARK *et al.* 2008; CONAB, 2022).

Melo Neto (2022) desenvolveu um estudo físico empírico e reológico do ligante asfáltico modificado pela borra do óleo de soja em baixos teores (1, 3 e 5%). Entretanto, o autor observou que a borra nos teores testados não reduziu a temperatura de PG (64°C), não viabilizando maior uso de RAP pelo método do *blending chart*, evidenciando a necessidade de investigar esse modificador em maiores teores a fim de verificar seu potencial como redutor de viscosidade e rigidez.

Buscando evitar o descarte errôneo desse subproduto, a utilização do mesmo na produção de misturas asfálticas é uma das maneiras de minimizar o impacto ambiental. Sendo assim, este estudo buscou analisar fisicamente e reologicamente a adição da borra do óleo de soja em altos teores, proveniente do processo de refino do óleo de soja, no ligante asfáltico a fim de investigar a atuação como redutora de viscosidade para ser utilizada em misturas asfálticas recicladas.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo geral*

Esta pesquisa buscou avaliar as características físicas empíricas e reológicas da adição da borra do óleo de soja ao ligante asfáltico classificado com penetração 50/70 como redutor de viscosidade nos teores de 7% e 9%.

1.1.2 *Objetivos específicos*

- Avaliar as propriedades do ligante asfáltico modificado com teores de borra do óleo de soja antes e depois de submetido ao procedimento de envelhecimento a curto prazo por meio de ensaios físicos empíricos (penetração, ponto de amolecimento e perda de massa);
- Determinar a temperatura ideal para mistura e compactação da mistura asfáltica por meio do ensaio de viscosidade rotacional;
- Determinar as características reológicas avançadas do ligante modificado com borra de óleo de soja utilizando reômetro de cisalhamento dinâmico (viscosidade rotacional, grau de desempenho, grau de desempenho contínuo e fluência e recuperação sob tensão múltipla).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Conceitos Iniciais

2.1.1 *Ligantes asfálticos*

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), o ligante asfáltico é considerado o mais importante material que forma o revestimento asfáltico, e é constituído de hidrocarbonetos advindos do petróleo, o qual tem o betume como principal item constituinte. Ele é amplamente usado como forma de revestimento em pavimentos, onde no Brasil, as estradas pavimentadas com revestimento asfáltico correspondem a cerca de 95% do total. Um dos principais motivos para esse vasto uso do asfalto, se dá em virtude de que ele atua como um ligante unindo os grãos, e ainda possui características importantes como: impermeabilidade, durabilidade e resistência à ação da maioria de ácidos, álcalis e sais, além da possibilidade de ser utilizado de forma aquecida ou emulsionada, com ou sem aditivos.

Com o passar dos anos, os pavimentos asfálticos vêm a se tornar quebradiços e duros, e devido a isso, têm risco de sofrer fadiga e danos térmicos gerados pela combinação das condições térmicas e das cargas de tráfego (CONG, 2020). Esse envelhecimento do pavimento pode ser causado a curto e a longo prazo, onde o primeiro acontece em função da usinagem da mistura asfáltica, o processo de espalhamento e o término da compactação, e o segundo se dá durante a vida útil do revestimento (MIRZA, 1993).

2.1.2 *Ligantes asfálticos modificados*

A combinação do aumento do tráfego de veículos com as variações climáticas, tem proporcionado um maior dano prematuro nos pavimentos flexíveis constituídos de ligantes asfálticos tradicionais, sendo necessário uma melhoria nos mesmos, com a finalidade de tornar seu desempenho e suas características melhores. Assim, são utilizados aditivos ou agentes modificadores para melhorar as propriedades mecânicas e elásticas dos ligantes asfálticos (ZHANG, 2015; MARINHO FILHO, 2017).

Os estudos realizados com ligantes asfálticos modificados, utilizando alguns tipos de aditivos, como por exemplo borrachas de pneus inservíveis, fibras, polímeros, óleos e ceras,

procuram melhorar as qualidades do ligante asfáltico, como aumentar a sua resistência à fadiga, ao trincamento térmico, à deformação permanente, além de melhorar a aderência entre o ligante e o agregado, buscando aumentar a resistência ao dano por umidade (ROSA, 2012; YILDIRIM 2007).

2.1.3 Uso de óleos em ligantes asfálticos

A depender do tipo de aditivo a ser utilizado na produção dos ligantes asfálticos, os benefícios e as desvantagens são distintos. Os aditivos químicos atuam na redução da temperatura de usinagem do asfalto, todavia, esses aditivos têm grande quantidade de óleos pesados, os quais podem vir a sofrer alterações no processo de envelhecimento do ligante asfáltico. Os óleos vegetais, por sua vez, possuem ácidos graxos insaturados em grandes quantidades, que são mais resistentes às altas temperaturas, sendo esse o motivo da sua escolha para a regeneração dos ligantes asfálticos (STIMILLI, VIRGILI, CANESTRARI, 2017; JI *et al.*, 2017).

Carvalho (2018), realizou a adição do óleo de girassol em misturas asfálticas modificadas nos teores de 1, 2 e 3%, para analisar as características do ligante com e sem a adição do aditivo. Os ensaios físicos utilizados para análise das propriedades do ligante foram os de: ponto de amolecimento, penetração, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) antes e após a realização do ensaio de *Rolling Thin-Film Oven* (RTFO) e também foi realizado o ensaio de viscosidade rotacional. Ainda, os ligantes foram caracterizados mecanicamente pela dosagem SUPERior PERforming asphalt PAVements (SUPERPAVE), por meio dos ensaios de *flow number*, *lottman* modificado, módulo de resiliência, resistência à tração e vida de fadiga. Os resultados encontrados demonstraram viabilidade técnica da incorporação do óleo de girassol no ligante asfáltico, tendo em vista que foi possível reduzir as temperaturas de compactação e de mistura em até 6°C.

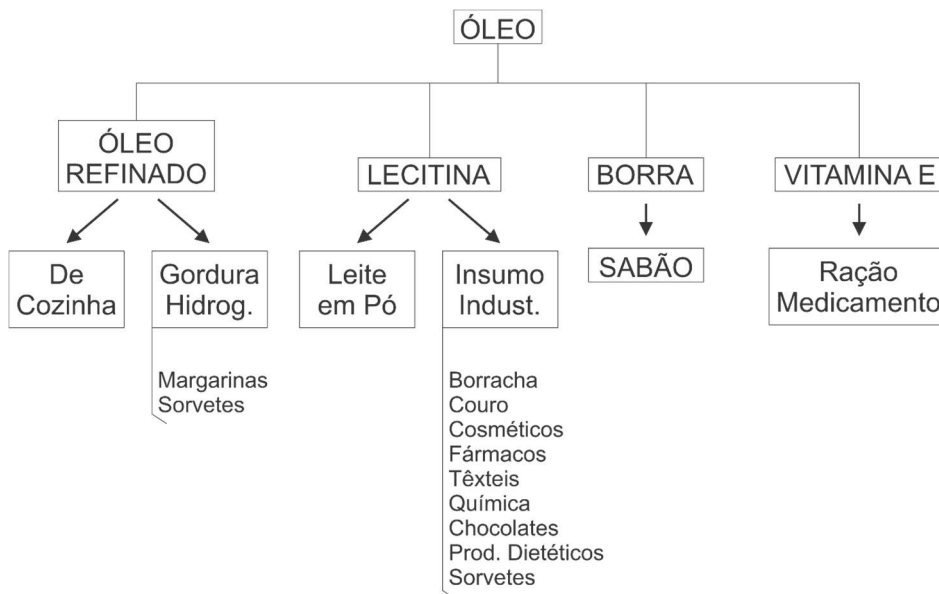
Um estudo a respeito das propriedades físicas e mecânicas de misturas asfálticas modificadas com o óleo de canola nos teores de 1, 2 e 3% foi realizado por Guerra (2019). Na primeira etapa da pesquisa foi realizada a caracterização dos ligantes antes e depois do ensaio RTFO, a segunda etapa constituiu na dosagem da mistura por meio da dosagem SUPERPAVE, e por fim, na terceira etapa foi feita a caracterização mecânica das misturas, utilizando os

ensaios de *flow number*, *lottman* modificado, módulo de resiliência, módulo dinâmico, resistência à tração e vida de fadiga. Os resultados desta pesquisa expuseram que todas as amostras obtiveram resultados mecânicos satisfatórios quando comparados às exigências das normas brasileiras e, ainda, verificou-se que houve uma redução de 6°C nas temperaturas de compactação e usinagem.

2.1.4 Borra do óleo de soja

Câmara (2006) declara que os produtos oriundos da soja atuam como insumos industriais na fabricação de diversos produtos e também são aplicados em processos distintos na produção de fibras e adesivos, antiespumantes, desinfetantes, entre outros. Do ponto de vista econômico, o produto que mais se destaca é a proteína do grão da soja, a qual está presente em teores de 45 a 53% nos óleos brutos e no farelo de soja produzidos a partir do processamento do grão. Esses produtos têm seu uso como matéria-prima em diversos processos industriais. A Figura 1 demonstra os produtos fabricados no processamento industrial do óleo de soja.

Figura 1 – Produtos fabricados no processamento industrial do óleo de soja



Fonte: Adaptado de Câmara (2006).

Portugal (2016) incorporou o óleo de soja e o óleo de milho ao ligante asfáltico os teores de 1, 2 e 3% para avaliação reológica do ligante. Os ensaios utilizados para analisar as amostras foram os de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, RTFO, especificação do PG, *multiple stress creep and recovery* (MSCR) e varredura de frequência. Para o teor de 1%, o ligante asfáltico não sofre alteração nas suas características reológicas e físicas e nem há um comprometimento do desempenho. Ainda, para o teor de 1%, houve uma redução média de 2,7°C na temperatura de compactação e usinagem para o óleo de soja. Para maiores teores percebeu-se que ocorre uma diminuição da viscosidade do ligante asfáltico, afetando o comportamento do mesmo.

2.1.5 Misturas asfálticas recicladas

Segundo Fonseca *et al.* (2014), além do ligante asfáltico ser um dos materiais de construção mais antigos, ele também é o mais importante e versátil do mundo, porém, alguns aspectos como a má execução, dimensionamento errôneo, mau uso das vias e o envelhecimento natural produzem grandes parcelas de resíduos asfálticos.

Diante da evolução tecnológica e da busca constante pela sustentabilidade visando a redução dos impactos gerados pela construção e reabilitação de rodovias, procura-se reciclar os pavimentos asfálticos existentes, utilizando o RAP na produção de novas misturas para aplicar sobre a camada de revestimento. Essa técnica consiste em transformar o material fresado em uma estrutura homogênea dimensionada para ser submetida aos esforços advindos do tráfego. Dentre os vários pontos positivos dessa reciclagem dos pavimentos, destacam-se a conservação dos agregados e dos ligantes, a preservação da geometria do pavimento existente, redução nos custos de construção, entre outros (PIRES *et al.*, 2013).

Torres *et al.* (2022) analisou o comportamento das misturas asfálticas com material fresado em teores na faixa de 0%, 30% e 60% e ligante modificado com óleo vegetal residual com teores em parcelas de 0%, 2 % e 4%. Os ensaios utilizados foram os de viscosidade rotacional, resistência à tração, módulo de resiliência, *flow number e lottman* modificado. Os resultados obtidos mostraram que a adição do óleo causou uma redução na viscosidade e nas temperaturas de compactação e usinagem da mistura. Ainda, no ensaio de resistência à tração,

a maior influência foi do teor de óleo, enquanto no ensaio de *lottman* modificado, o teor do material fresado foi mais influente.

Melo Neto (2022) avaliou a utilização da borra do óleo de soja e do ácido graxo da borra do óleo de soja como agente rejuvenescedor em misturas asfálticas recicladas em teores de 1, 3 e 5%. O ligante foi caracterizado utilizando os ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional e PG antes e após o envelhecimento a curto prazo (RTFO), e MSCR. A análise mecânica das misturas constituiu na análise por meio dos ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência, suscetibilidade à umidade, módulo dinâmico, deformação permanente e fadiga. Ainda, foram realizadas análises de circularidade e um estudo comparativo do custo de produção das misturas. Os resultados mostraram que a adição do RAP melhorou a resistência à deformação e o ácido graxo elevou o desempenho à fadiga das misturas recicladas nos teores que foram testados.

2.2 Ponderações

No decorrer deste trabalho, mostrou-se que o ganho da rigidez das misturas asfálticas recicladas está relacionado às propriedades oxidativas do RAP. A utilização de teores elevados de RAP (acima de 30%) necessita da incorporação de um agente rejuvenescedor ou um ligante asfáltico mais macio para compensar a rigidez do RAP (SILVA et al., 2022)

A literatura, nos últimos anos, tem trazido estudos analisando as misturas asfálticas recicladas com diversos agentes rejuvenescedores, entre eles ácidos, óleos e compostos rejuvenescedores. Porém, tem-se a necessidade de estudar novos agentes rejuvenescedores, provenientes de resíduos de processos industriais, para atuarem como redutores de viscosidade e que sejam viáveis após a análise mecânica, ambiental e econômica (MELO NETO et al., 2022).

A borra do óleo de soja é derivada do processo de refinamento do óleo de soja, de grande potencial de reciclagem e de baixo custo, e por isso é necessária a investigação desse material como agente rejuvenescedor, a fim de melhorar o desempenho mecânico da mistura reciclada com teor elevado de RAP.

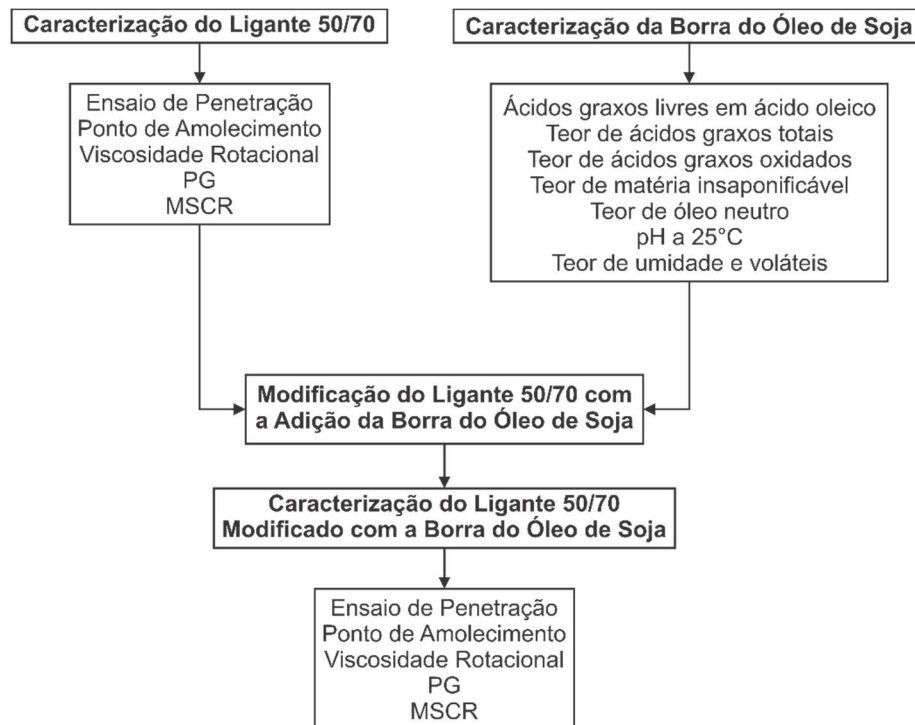
A partir dos pontos elencados, este estudo teve a finalidade de contribuir com a literatura no tocante à avaliação das características físicas empíricas e reológicas da adição da borra do

óleo de soja ao ligante asfáltico classificado com penetração 50/70 como redutor de viscosidade nos teores de 7% e 9%.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção 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 físico e reológico do ligante asfáltico com a borra do óleo de soja.

Figura 2 – Fluxograma geral do programa experimental



Fonte: Autor (2022).

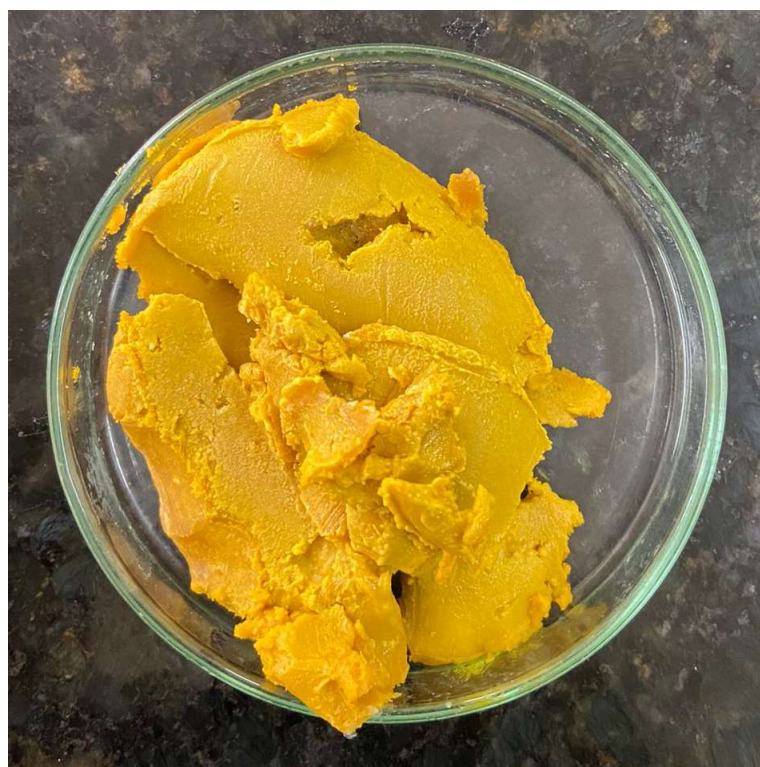
Os processos de modificação e caracterização do ligante asfáltico foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP, localizado na Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

3.1 Materiais

3.1.1 Borra do óleo de soja

Neste estudo, o aditivo utilizado foi a borra do óleo de soja, um material derivado do processamento do refino do óleo de soja. A borra do óleo de soja foi obtida pela empresa IMCOPA, que está localizada no estado do Paraná, Brasil. A Figura 3 apresenta a borra do óleo de soja utilizada nesse estudo.

Figura 3 – Borra do óleo de soja



Fonte: Autor (2022).

A IMCOPA disponibilizou a borra do óleo de soja sem dados característicos do material, a qual foi transportada por avião, em tonel de plástico vedado e conservada em refrigerador. O material utilizado foi o mesmo da pesquisa de Melo Neto (2022), onde o autor caracterizou a borra do óleo de soja segundo as normas da *American Oil Chemists' Society* (AOCS). A Tabela 1 apresenta os resultados encontrados por Melo Neto (2022) nos ensaios de caracterização da borra do óleo de soja.

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

Ensaio	Resultado	Norma
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 G 5-40: 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: Melo Neto (2022).

O resultado obtido de 41,59% para o teor de ácidos graxos totais se encontra entre os limites de 35 a 50% encontrados por Swern (1982). O alto valor encontrado para a umidade pode ter influência 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 a 25°C possibilitou a verificação do grau de alcalinidade do material, que se mostrou básico ou alcalino ao apresentar valor acima de 7.

3.1.2 Ligante asfáltico

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 tipo de ligante foi escolhido visando a sua vasta utilização na Região Nordeste do Brasil. A sua caracterização foi realizada por meio dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, performance grade e MSCR.

3.2 Procedimentos de teste

3.2.1 Modificação do ligante asfáltico

Foi realizada a modificação do ligante asfáltico com a finalidade de investigar o comportamento físico empírico e reológico do ligante asfáltico, denominado AB devido à designação inglesa *asphalt binder*, em teores distintos, sendo eles 7% e 9% de borra de óleo de soja. Os teores utilizados visaram preencher as lacunas do estudo de Melo Neto (2022). O processo de mistura (modificador-ligante) foi realizado por um agitador mecânico FISATOM, modelo 722D.

- O ligante foi submetido à estufa para pré-aquecimento por cerca de 90 minutos para garantir a fluidez necessária para realizar a homogeneização;
- O material foi colocado em um béquer e posto sobre o agitador mecânico, sendo submetido à rotação de 600 rpm visando a homogeneidade na distribuição da mistura;
- Após atingir a temperatura de estabilização (140°C), foram adicionados os aditivos na proporção por peso do ligante puro, e elevou-se as rotações para 1.000 rpm, permanecendo as amostras por 30 minutos para homogeneização da mistura, nos teores de 7% e 9%.

A técnica utilizada tem como base os estudos realizados por Melo Neto (2022). Após o processo de modificação do ligante asfáltico, foi observado homogeneização das amostras de ligante, sem a presença de grumos. A Figura 4 apresenta o quadro de nomenclaturas utilizadas para as respectivas amostras utilizadas na pesquisa.

Quadro 1 - Nomenclaturas das amostras utilizadas na pesquisa

Amostra	Nomenclatura
Ligante asfáltico com grau de penetração 50/70	AB
AB + 7% da borra do óleo de soja	7%BOS
AB + 9% da borra do óleo de soja	9%BOS

Fonte: Autor (2022).

3.2.2 *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. Este ensaio é regido pela norma ASTM D2872: 2019 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, tendo essas condições a finalidade de causar a oxidação e volatilização de componentes leves, como acontece no processo de usinagem até a compactação *in loco*.

3.2.3 *Ensaio físico empírico*

Na execução de todos os ensaios foram utilizadas amostras em duplicata a fim de conseguir um resultado mais representativo.

3.2.3.1 *Penetração*

Esse ensaio foi regido pela norma ASTM D5M: 2020 e visou determinar em décimos de milímetro a profundidade a qual uma agulha de massa 100g penetrava nas amostras de ligante asfáltico por cinco segundos, a 25°C. Para cada amostra foram feitas 5 penetrações em pontos distintos. A Figura 4 mostra as amostras colocadas para aquecimento até 25°C.

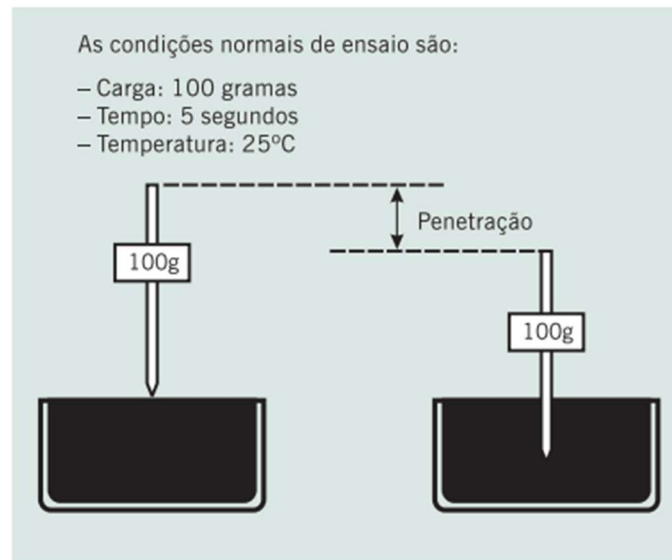
Figura 4 - Amostras de ligante asfáltico utilizadas no ensaio de penetração



Fonte: Autor (2022).

A Figura 5 apresenta o esquema básico do ensaio de penetração, seguindo as exigências da norma vigente ASTM D5M: 2020.

Figura 5 – Esquema básico do ensaio de penetração



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

Após a obtenção dos resultados, das amostras envelhecidas e virgens, ao ensaio de penetração, foi calculada a penetração retida (PEN_{retida}) seguindo a Equação 1. Esse dado representa a sensibilidade do material ao envelhecimento.

$$PEN_{retido} = \frac{PEN_{pós\ RTFO}}{PEN_{pré\ RTFO}} * 100 \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

PEN_{retido} : variação percentual da amostra após o processo de envelhecimento;

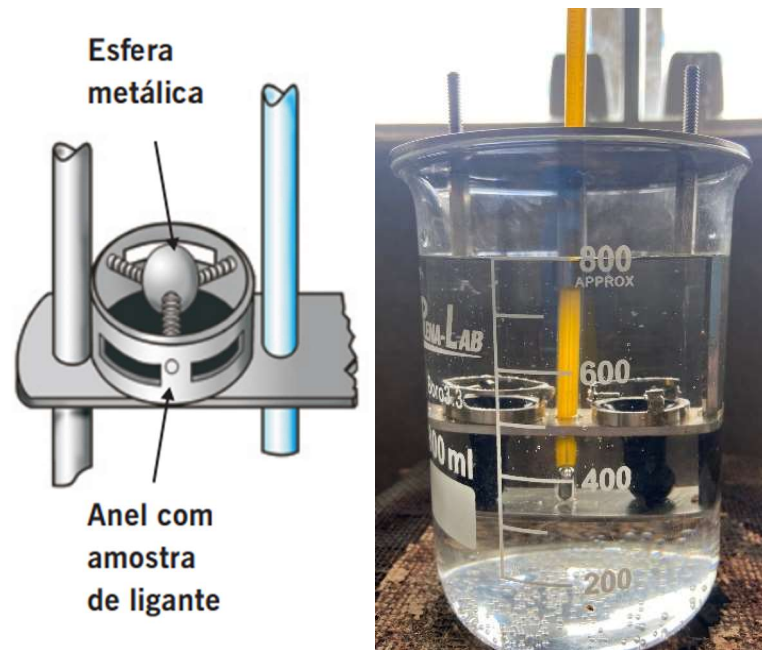
$PEN_{pós\ RTFO}$: penetração da amostra após o processo de envelhecimento;

$PEN_{pré\ RTFO}$: penetração da amostra antes do processo de envelhecimento.

3.2.3.2 Ponto de amolecimento

Esse ensaio seguiu as diretrizes da norma ASTM D36M - 14: 2020 e buscou a medida empírica que corresponde à temperatura em que o ligante asfáltico amolece e alcança condições específicas de escoamento. Neste ensaio, uma bola de aço com peso e dimensões determinados em norma é colocada centralizada sobre a amostra que está confinada em um anel metálico. Todo o aparato é colocado em banho de água dentro de um béquer, onde o banho tem sua temperatura elevada à taxa de 5°C/minuto. Conforme o ligante asfáltico vai amolecendo, e a bola vão deslocando-se até o fundo do béquer. O momento no qual a amostra aquecida toca uma placa que se encontra no fundo do aparato, a temperatura é marcada e assim, é determinado o ponto de amolecimento do ligante asfáltico.

Figura 6 - Detalhe esquemático do anel e bola de aço e aparato utilizado no ensaio de ponto de amolecimento



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

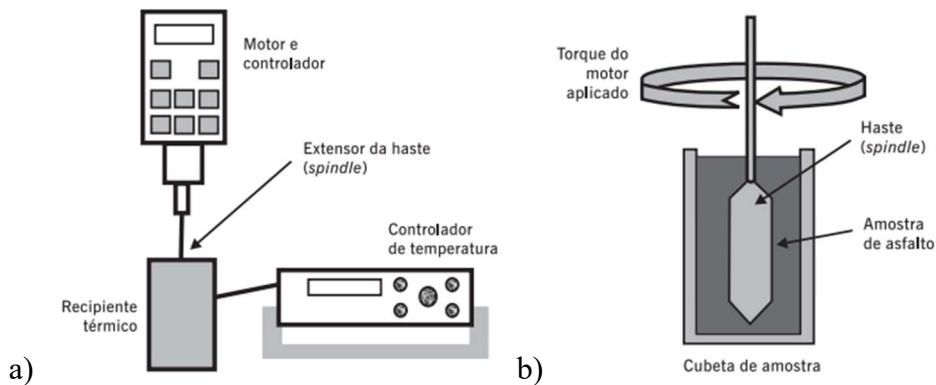
3.2.4 ENSAIOS REOLÓGICOS

Assim como os ensaios físicos empíricos, na execução dos ensaios reológicos foram utilizadas amostras em duplicata.

3.2.4.1 Viscosidade rotacional

Neste ensaio, a norma utilizada foi a ASTM D4402: 2015. Este ensaio também é conhecido por *Brookfield*, nome dado ao viscosímetro utilizado no ensaio. Para realizar o ensaio, a amostra do ligante asfáltico é colocado em um recipiente que possui a temperatura controlada, em seguida, o eixo com rotação e velocidade controlada é colocado dentro do recipiente que contém a amostra e a partir do valor aplicado de torque no eixo, é determinado o valor da viscosidade rotacional. A Figura 7 traz o esquema do equipamento e do eixo utilizados no ensaio de viscosidade rotacional.

Figura 7 - Esquema dos materiais do ensaio de viscosidade rotacional: a) esquema do equipamento, b) esquema do eixo na amostra de asfalto



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

3.2.4.2 Performance Grade (PG)

Para realizar esse ensaio, foi tomado como base a ASTM D6373: 2021. Este ensaio, por meio da utilização do reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), visa a determinação da temperatura máxima em que o ligante, após sofrer deformação permanente, consegue manter a sua resistência. Os ligantes mais viscosos, tendem a apresentar valores de PG maiores que àqueles menos viscosos.

Figura 8 - Reômetro de Cisalhamento Dinâmico



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

Durante a realização do ensaio, foi verificado o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ com a temperatura partindo de 46°C, sendo elevada em 6°C. De posse dos dados do ensaio com as amostras antes e após o envelhecimento a curto prazo, foi possível calcular o índice de envelhecimento (IA), conforme a Equação (2).

$$AI = \frac{G^*/\text{sen}\delta_{\text{pós RTFO}}}{G^*/\text{sen}\delta_{\text{pré RTFO}}} \quad \text{Equação (2)}$$

3.2.4.3 Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

Este ensaio foi regido pela norma ASTM D7405: 2020. O ensaio também utiliza o reômetro de cisalhamento dinâmico e, através da aplicação de 20 ciclos de carregamento, dos quais os 10 primeiros ciclos estavam sob a tensão de 0,1 kPa e as demais sob 3,2 kPa de tensão, buscou encontrar o percentual de recuperação elástica (%R), a compilância não-recuperável (Jnr) do ligante asfáltico e a diferença percentual entre as compilâncias não-recuperáveis de 0,1 kPa e 3,2 kPa ($J_{nr\text{diff}}$). O ensaio foi realizado na temperatura de PG do ligante asfáltico, a fim de comparar as amostras do ligante puro e modificado.

4 RESULTADOS

Esta seção aborda os resultados e discussões dos ensaios físicos empíricos e reológicos realizados na parte experimental do ligante asfáltico modificado com a adição da borra de óleo de soja.

4.1 Envelhecimento a curto prazo

A Norma DNIT 095/2006 – ME, preconiza uma variação de massa menor que 0,5%. Após a análise dos resultados, nota-se que as amostras do ligante asfáltico puro e do ligante asfáltico modificado com 7% da borra do óleo de soja apresentaram uma variação de massa aceitável de 0,12% e 0,143%, respectivamente, enquanto a amostra com 9% de borra de óleo de soja apresentou uma variação de 0,835, valor superior ao permitido em norma.

De acordo com Morilha Júnior (2004), a elevada variação na massa da amostra pode estar relacionada com a volatilização da parte aromática do ligante durante o ensaio. Em outras palavras, quando se tem uma alta variação de massa, indica que aconteceu a perda de componentes do ligante asfáltico. Essa perda é referente aos componentes químicos mais voláteis, que evaporam em temperaturas de até 160°C, como a fração aromática.

A Tabela 2 traz os resultados encontrados após o processo de envelhecimento (RTFO) para as amostras analisadas.

Tabela 2 - Resultados da variação de massa das amostras após RTFO

AB (%)	7%BOS (%)	9%BOS (%)
0,12	0,143	0,835

Fonte: Autor (2022).

4.2 Análise física empírica do ligante asfáltico

4.2.1 Penetração

O ligante modificado apresentou um aumento no valor de penetração quando comparado com os valores do ligante puro (AB) tanto para o teor de 7% quanto para o de 9%. A penetração retida permite verificar a sensibilidade do ligante ao envelhecimento: quanto maior for a porcentagem de penetração retida menor será a sensibilidade ao envelhecimento. A Resolução ANP N° 19/2005 define o mínimo de 55% para esse parâmetro. Esse parâmetro é calculado por meio da razão do valor da penetração após RTFO e antes RTFO, apresentado em porcentagem.

A amostra que apresentou a maior penetração retida foi a 7%BOS, ligante asfáltico modificado com 7% de borra de óleo de soja, com 89,65% de penetração retida, seguida da amostra 9%BOS, 9% de borra de óleo de soja, apresentou uma penetração retida de 87,44%, enquanto a amostra de ligante asfáltico puro teve uma penetração retida de 67,24%.

Melo Neto (2022) realizou o mesmo estudo com teores menores de borra de óleo de soja e observou que houve também um aumento na penetração para as amostras. Onde os maiores valores de penetração quando comparados à amostra padrão ocorreram nas amostras com a adição de 5% de borra de óleo de soja (antes do ensaio de RTFO) e 1% de borra de óleo de soja (após o ensaio de RTFO), com 95,08% e 72,22%, respectivamente.

Vale salientar, que para a amostra modificada com 1% de borra de óleo de soja, não houve diferença no resultado do ensaio de penetração antes e após o processo de envelhecimento (RTFO).

A Tabela 3 expõe os resultados obtidos no ensaio de penetração para as amostras ensaiadas.

Tabela 3 - Resultados do ensaio de penetração 0,1 mm (100g, 5s a 25°C)

Antes RTFO		
AB	7%BOS	9%BOS
58	85	86
Após RTFO		
AB	7%BOS	9%BOS
39	76,2	75,2
Penetração Retida (%)		
AB	7%BOS	9%BOS
67,24	89,65	87,44

Fonte: Autor (2022).

4.2.2 *Ponto de amolecimento*

Observa-se que o ligante asfáltico modificado pela borra do óleo de soja antes do RTFO apresentou uma leve redução na amostra 7%BOS de 0,5°C, sendo assim, uma diferença de 0,96%, enquanto a amostra 9%BOS manteve o seu ponto de amolecimento igual ao da amostra padrão AB, em 52°C. Para as amostras após o RTFO, a maior diferença ocorreu na amostra 7%BOS, com 2,5°C de redução, enquanto na amostra 9%BOS a redução foi de 2°C, que correspondem a uma redução de 4,46% e 3,57%, respectivamente.

Esses resultados condizem com os resultados de Portugal (2016), que já se era esperado. Esses resultados implicam em uma tendência de redução do ponto de amolecimento, tanto antes quanto após do ensaio RTFO para a amostra padrão AB quando modificada pela borra do óleo de soja.

Segundo as orientações da DNIT 095/2006 – ME, o limite máximo para a variação da temperatura do ponto de amolecimento após RTFO é de 8°C, sendo assim, nota-se que o maior valor de variação foi para a mostra do ligante puro (AB) de 4°C.

A Tabela 4 apresenta os resultados que foram colhidos no ensaio de ponto de amolecimento para as amostras do ligante asfáltico puro e do ligante modificado com 7% e 9% da borra do óleo de soja.

Tabela 4 - Resultados do ensaio de ponto de amolecimento

Antes RTFO (°C)		
AB	7%BOS	9%BOS
52	51,5	52
Após RTFO (°C)		
AB	7%BOS	9%BOS
56	53,5	54
Variação de temperatura antes e após RTFO (°C)		
AB	7%BOS	9%BOS
4	2	2

Fonte: Autor (2022).

4.3 Análise reológica do ligante asfáltico

4.3.1 Viscosidade rotacional

Analisando a Tabela 5, verifica-se que houve um aumento da viscosidade para o ligante modificado com 7% e 9% em quase todas as temperaturas, quando comparado com a amostra pura, antes e após RTFO. A redução ocorreu, antes do RTFO, na amostra 7%BOS sob temperatura de 165°C, e na amostra 9%BOS submetida às temperaturas de 142°C, 150°C, 162°C e 177°C.

Para a situação após RTFO, a redução aconteceu na amostra 7%BOS apenas na temperatura de 142°C, enquanto para a amostra 9%BOS não houve redução. As temperaturas de mistura e compactação estão relacionadas à redução da viscosidade causada pela adição da borra do óleo de soja. Assim, é importante verificar se houve redução dessas temperaturas para os teores testados.

A temperatura de projeto do ligante asfáltico na produção de misturas asfálticas deve ser de 0.17 ± 0.02 Pa.s para ligantes asfálticos convencionais testados no viscosímetro rotacional. A partir dos dados obtidos na Tabela 5, foi construído o gráfico de viscosidade *versus* temperatura, apresentado na Figura 8.

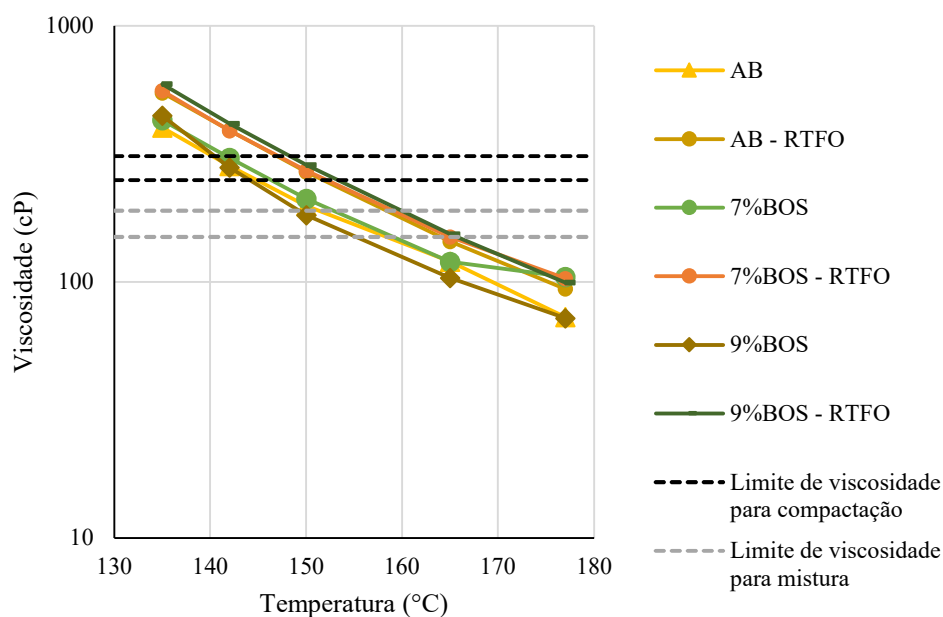
A Tabela 5 apresenta os resultados que foram conseguidos no ensaio de viscosidade rotacional para as amostras.

Tabela 5 - Resultados do ensaio de viscosidade rotacional

Antes RTFO					
AB		7%BOS		9%BOS	
Temp. (°C)	Visc. Média	Temp. (°C)	Média	Temp. (°C)	Média
135	401	135	428,75	135	446,25
142	284	142	305,70	142	280,00
150	198	150	211,00	150	182,50
165	120	165	119,65	165	103,65
177	73	177	104,75	177	72,25
Após RTFO					
AB		7%BOS		9%BOS	
Temp. (°C)	Visc. Média	Temp. (°C)	Média	Temp. (°C)	Média
135	548	135	558,75	135	593,75
142	391	142	390,00	142	415,70
150	269	150	272,00	150	286,50
165	144	165	150,00	165	154,00
177	94	177	103,25	177	99,50

Fonte: Autor (2022).

A partir da análise do gráfico presente na Figura 9, pôde-se encontrar os valores limites das temperaturas de compactação e de mistura.

Figura 9 - Gráfico de viscosidade versus temperatura

Fonte: Autor (2022).

Assim, a Tabela 6 apresenta as temperaturas de compactação e mistura das respectivas amostras trabalhadas. A partir dos resultados obtidos, nota-se que quanto maiores os teores da borra de óleo de soja no ligante asfáltico, maior será a redução das temperaturas de compactação e de mistura quando comparado com as amostras de ligante asfáltico puro, sendo a redução da temperatura de compactação na ordem de 4,48% e 6,55% para as amostras modificadas com 7% e 9%, enquanto para a temperatura de mistura a redução para 7% e 9% de concentração foi de, respectivamente, 4,47% e 6,39%.

Tabela 6 - Temperaturas de compactação e de mistura das amostras

Antes RTFO		
Amostra	Temperatura de Compactação (°C)	Temperatura de Mistura (°C)
AB	143 – 147	154 – 159
7%BOS	136 – 141	147 – 152
9%BOS	134 – 137	144 – 149

Fonte: Autor (2022).

4.3.2 Performance Grade (PG)

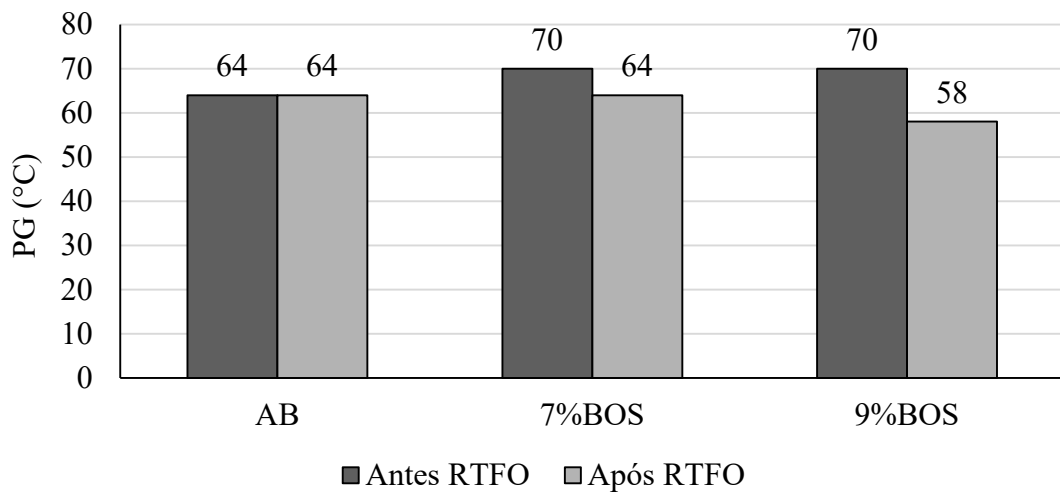
Dos ensaios de determinação dos valores de *Performance Grade* (que representa a faixa de temperatura máxima e mínima de utilização do ligante) encontrados, foram dispensados os que eram responsáveis por determinar a temperatura mínima de PG, tendo em vista que em países de clima tropical, como o Brasil, as chances de ocorrerem temperaturas negativas são mínimas. A Figura 10 apresenta os resultados das temperaturas de PG e PG contínuo do uso do ligante asfáltico antes e após RTFO.

Nota-se que a amostra 7%BOS apresentou uma redução, após RTFO, na temperatura de PG de um degrau (correspondente a amplitude de 6°C), 70°C para 64°C e a amostra 9%BOS diminuição na sua temperatura de PG em dois degraus, de 70°C para 58°C. Entretanto, esperava-se um comportamento mais eficaz na redução da temperatura de PG com o uso da borra do óleo de soja, conforme estudo de Melo Neto (2022). Uma justificativa para o aumento do PG pode ser devido ao alto teor de umidade presente no material (aproximadamente 40%).

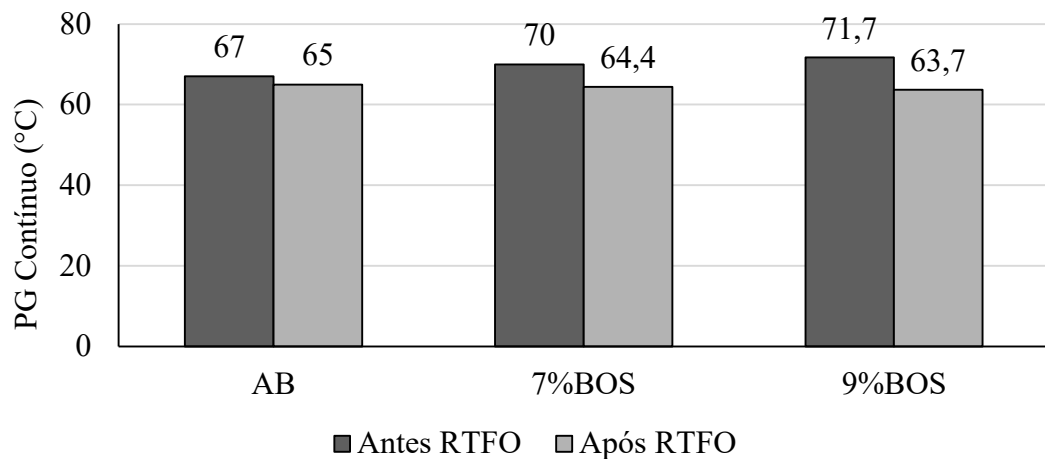
À medida que se aumenta a quantidade de borra adicionada ao ligante asfáltico, consequentemente se aumenta a quantidade de água também, o que pode ter oxidado o ligante asfáltico e aumentado sua rigidez. Assim, pode-se apontar que o aumento no teor de borra do óleo de soja não apresentou comportamento linear na redução do PG como era esperado por Melo Neto (2022).

Figura 10 - Resultados de PG da amostra pura e das amostras modificadas: a) PG, b) PG contínuo

a)



b)



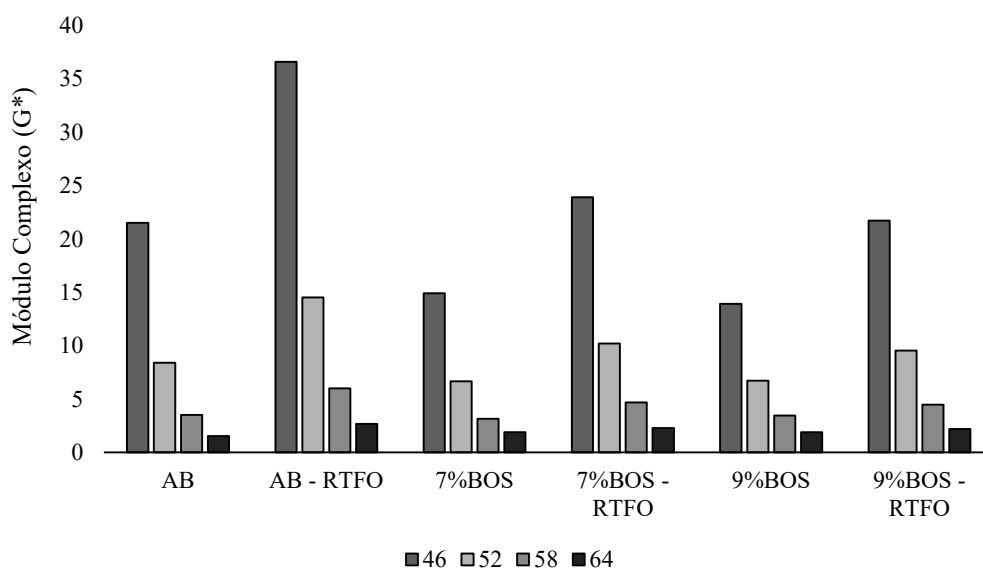
Fonte: Autor (2022).

A Figura 11, apresenta os valores da variação do parâmetro Módulo Complexo (G^*) das amostras ensaiadas em função da temperatura.

Na maioria das temperaturas antes e após RTFO, o ligante asfáltico puro apresentou módulos complexos maiores com a elevação da temperatura, quando comparado aos ligantes asfálticos modificados. Para a temperatura de 64°C, antes do RTFO, a amostra pura AB apresentou um Módulo Complexo de 1,53, inferior ao das amostras 7%BOS e 9%BOS, que obtiveram os valores de 1,87 e 1,88 de Módulo Complexo, respectivamente, implicando numa maior rigidez no ligantes asfálticos modificados para essa situação.

Assim, analisando o comportamento reológico de forma geral, o desempenho da amostra pura foi maior que o das amostras modificadas com a borra do óleo de soja. Nota-se que após o envelhecimento a curto prazo, há um acréscimo no valor do Módulo Complexo de todas as amostras modificadas, porém os valores ainda são inferiores aos da amostra pura.

Figura 11 - Valores do parâmetro Módulo Complexo (G^*) em função da temperatura antes e após RTFO



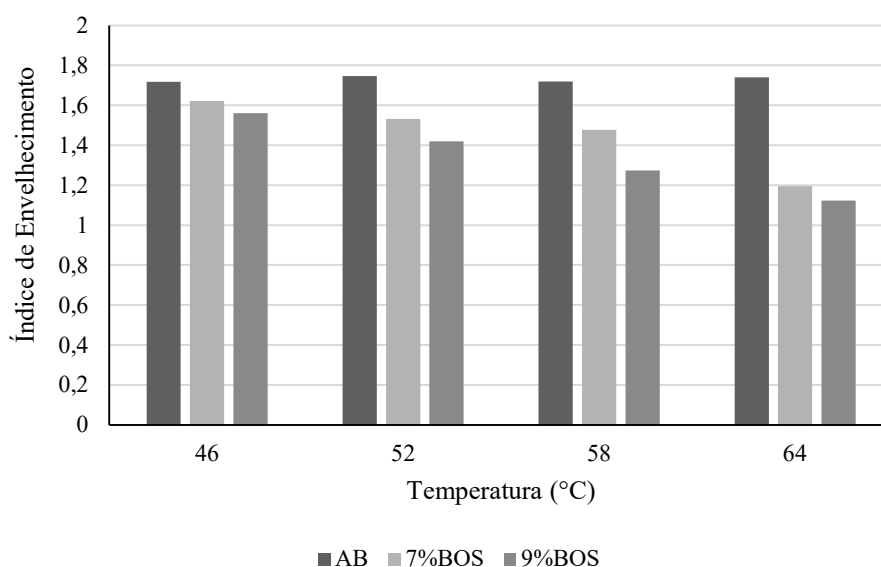
Fonte: Autor (2022).

A Figura 12 demonstra os valores do índice de envelhecimento (AI) conseguidos por meio da relação entre os parâmetros $G^*/\sin\delta$ das amostras antes e após RTFO para cada temperatura de aferição dos parâmetros.

A adição da borra do óleo de soja ao ligante asfáltico puro causou uma redução no índice de envelhecimento do ligante em todas as temperaturas analisadas, onde as maiores diminuições ocorreram na temperatura de 64°C, com redução 31,28% para 7%BOS e de 35,40% para 9%BOS. Esse comportamento pode ser justificado pela presença de frações aromáticas presente na borra do óleo de soja.

Ao comparar com os resultados obtidos por Melo Neto (2022), as amostras que foram submetidas às temperaturas de 46° e 52°C apresentaram suscetibilidade à oxidação e volatilização, porém a partir da temperatura de 58°C, as amostras reduziram a oxidação com a presença dos modificadores.

Figura 12 - Índice de envelhecimento (AI) das amostras de ligante asfáltico



Fonte: Autor (2022).

4.3.3 *Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)*

A realização deste ensaio tornou possível a análise e avaliação do percentual de recuperação (%R – que apresenta os dados de elasticidade), da compilância não-recuperável (J_{nr} – onde são fornecidos os dados de suscetibilidade ao acúmulo de deformações permanentes, onde os valores mais baixos de J_{nr} implicam na resistência do ligante a este efeito) e a diferença entre as compilâncias não-recuperáveis (J_{nr,diff} – que apresenta os dados em relação

à sensibilidade ao aumento do nível de tensão). A Tabela 7 apresenta os resultados do ensaio MSCR realizado a 64°C (temperatura máxima de PG do ligante asfáltico) e também para as amostras de 7%BOS e 9%BOS nas suas respectivas temperaturas máximas de PG.

Observa-se que os valores obtidos de Jnr a 0,1 kPa para as amostras 7%BOS e 9%BOS (a 64°C), houve um aumento no valor de Jnr de 12,35% e 7,65%, respectivamente, enquanto para a amostra 9%BOS (a 58°C) houve uma redução de 43,53%. Os valores de Jnr obtidos a 3,2 kPa mostram um acréscimo de 37,86% e 43,34% nas amostras 7%BOS e 9%BOS (a 64°C), respectivamente, e uma redução de 62,66% na amostra 9%BOS (a 58°C). As amostras 7%BOS e 9%BOS a 64°C tiveram valores de Jnr a 3,2 kPa acima do especificado em norma, o que implicam na sua inviabilidade para utilização.

Altos valores Jnr a 3,2 kPa implicam em um ligante asfáltico mais fluido e, conseqüentemente, um ligante mais suscetível a deformações permanentes. Um ligante mais fluido por si só não é eficaz sozinho, porém a sua união com o RAP pode compensar a sua rigidez, sendo possível uma adição de quantidades maiores de RAP.

Os valores de Jnr diferencial (Jnr_{diff}) representam a diferença, em porcentagem, entre o Jnr a 0,1 kPa e 3,2 kPa. Para os ligantes asfálticos puro e modificado, esse parâmetro tem a função de exibir a sensibilidade das amostras ao aumento dos níveis de tensão e, de acordo com a norma AASTHO M320 (2017), devem ser inferiores a 75%. Assim, para todas as amostras ensaiadas, observa-se que os valores de Jnr, diff foram inferiores ao limite de 75%, o que mostra que as amostras são adequadas para a utilização nessa amostra de temperatura.

Tabela 7 - Resultados do ensaio de Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

Amostra	Temp. de Ensaio (°C)	Percentual de Recuperação (%)		Compliancia não recuperável Jnr (kPa^{-1})		Jnr _{diff} (%)	Nível de tráfego
		0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa		
AB	64	5,03	0,37	3,40	3,83	12,68	Padrão (S)
7%BOS	64	6,74	1,09	3,82	5,28	38,17	-
9%BOS	64	15,18	1,10	3,66	5,49	50,13	-
9%BOS	58	23,02	3,44	1,48	2,40	62,51	Padrão (S)

Fonte: Autor (2022).

Tabela 8 - Resumo dos Resultados

RESULTADOS							
	AB		7%BOS		9%BOS		
Penetração Retida (%)	67,24	✓	89,64		87,44		
Varição de massa do ligante (%)	0,12	✓	0,143	✓	0,835		
Varição da Temperatura do Ponto de Amolecimento (°C)	4		2	✓	2	✓	
Viscosidade Rotacional (cP) Antes RTFO	135 °C	401	✓	428,75		446,25	
	142 °C	284		305,70		280,00	✓
	150 °C	198		211,00		182,50	✓
	165 °C	120		119,65		103,65	✓
	177 °C	73		104,75		72,25	✓
Viscosidade Rotacional (cP) Após RTFO	135 °C	548	✓	558,75		593,75	
	142 °C	391		390,00	✓	415,70	
	150 °C	269	✓	272,00		286,50	
	165 °C	144	✓	150,00		154,00	
	177 °C	94	✓	103,25		99,50	
Temperatura de Compactação (°C)	143 – 147		136 – 141		134 – 137	✓	
Temperatura de Mistura (°C)	154 – 159		147 – 152		144 – 149	✓	
Performance Grade (°C) Antes RTFO	64	✓	70		70		
Performance Grade (°C) Após RTFO	64		64		58	✓	
Performance Grade Contínuo (°C) Antes RTFO	67	✓	70		71,7		
Performance Grade Contínuo (°C) Após RTFO	65		64,4		63,7	✓	
Módulo Complexo (G*) Antes RTFO	46 °C	21,50		14,90		13,90	✓
	52 °C	8,40		6,66	✓	6,70	
	58 °C	3,50		3,14	✓	3,45	
	64 °C	1,53	✓	1,87		1,88	
Módulo Complexo (G*) Após RTFO	46 °C	36,60		23,90		21,70	✓
	52 °C	14,50		10,20		9,54	✓
	58 °C	6,00		4,67		4,45	✓
	64 °C	2,65		2,26		2,17	✓
Índice de Envelhecimento (AI)	46 °C	1,72		1,62		1,56	✓
	52 °C	1,75		1,53		1,42	✓
	58 °C	1,72		1,48		1,27	✓
	64 °C	1,74		1,19		1,12	✓
MSCR Jnr a 0,1 kPa	58 °C	-		-		1,48	
	64 °C	3,40		3,82	✓	3,66	
MSCR Jnr a 3,2 kPa	58 °C	-		-		2,40	
	64 °C	3,83		5,28		5,49	✓

Fonte: Autor (2022).

Assim, ao analisar o desempenho de cada amostra individualmente, nota-se que todas têm destaque em algum ensaio. Porém a que mais possui resultados satisfatórios é a amostra que foi modificada com 9% de borra do óleo de soja.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nesta seção serão apresentadas as conclusões obtidas por meio dessa pesquisa, bem como sugestões para pesquisas futuras envolvendo o mesmo objeto de estudo.

A realização de estudos físicos empíricos e reológicos de amostras de ligante asfáltico modificado pela borra do óleo de soja em altos teores pôde permitir apontar algumas conclusões.

5.1 Considerações finais

O alto teor de umidade presente na borra do óleo de soja pode ter contribuído no processo de oxidação do ligante asfáltico no processo de modificação e envelhecimento a curto prazo, acarretando uma maior rigidez ao ligante asfáltico.

A penetração foi elevada e o ponto de amolecimento reduzido, implicando em um ligante mais fluido. As temperaturas de PG antes do processo de envelhecimento estavam maiores que os valores da amostra de referência, porém após o envelhecimento os valores encontrados foram iguais ou menores que os de referência. Assim, o modificador não foi eficaz na redução da temperatura de PG, não sendo viável sua utilização em misturas asfálticas recicladas.

As temperaturas de mistura e compactação foram reduzidas com os dois teores testados (7% e 9%) sem comprometer o desempenho físico e reológico do ligante asfáltico, apresentando um possível potencial como aditivo para misturas asfálticas mornas.

A adição desse modificador reduziu a suscetibilidade à deformação permanente no teor de 9%. Ou seja, a borra do óleo de soja não alterou de forma acentuada o comportamento do ligante asfáltico, mas conseguiu amenizar as temperaturas de trabalho e produção de misturas asfálticas, podendo proporcionar redução do consumo de energia e as emissões de CO₂ em usinas asfálticas.

Um dos requisitos para materiais serem implementados como agentes rejuvenescedores em misturas asfálticas recicladas é a redução do PG do ligante asfáltico convencional, antes e

após o RTFO, o que não foi conseguido com o uso da borra do óleo de soja nos teores testados. Entretanto, testes reológicos com ligante asfáltico modificado pela borra do óleo de soja, após ser submetida a um processo de secagem para redução do teor de umidade, são incentivados.

Dessa forma, a borra do óleo de soja se apresentou um material viável, devido ao seu baixo custo e ao seu aspecto sustentável, como redutor de temperaturas de mistura e compactação, mas não demonstrou efeito rejuvenescedor para uso em misturas asfálticas recicladas.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

Visando uma investigação mais profunda dos resultados encontrados nesse estudo, propõe-se os seguintes trabalhos futuros:

- Analisar o uso da borra de outros óleos vegetais, com a finalidade de expandir a quantidade de materiais disponíveis para serem utilizados como agentes rejuvenescedores;
- Verificar a influência do processo de secagem da borra do óleo de soja no desempenho físico e reológico do ligante asfáltico;
- Avaliar o desempenho mecânico de misturas asfálticas com a borra do óleo de soja antes e após processo de secagem;
- Análise física empírica e reológica de ligante asfáltico modificado com borra do óleo de soja submetido a envelhecimento a longo prazo.

REFERÊNCIAS

- 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.
- BERNUCCI, L. B. *et al.* **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: Formação básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS. 2008.
- CAI, X., ZHANG, J., XU, G., GONG, M., CHEN, X., YANG, J., “**Internal aging indexes to characterize the aging behavior of two bio-rejuvenated asphalts**”, *Construction and Building Materials*, v. 220, pp. 1231-1238, 2019.
- CÂMARA, G. M. de S. **Potencial da cultura da soja como fonte de matéria-prima para o programa nacional de produção e uso de biodiesel**. CÂMARA, G. M. de S.; HEIFFIG, L. S. (Coord.) Agronegócio de plantas oleaginosas: matérias-primas para biodiesel. Piracicaba: ESALQ/USP/LPV, 2006. p. 123-154.
- CARVALHO, J. R. **Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileiro – grãos: Sétimo levantamento, abril 2022 – safra 2021/2022. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2022.

CONG, P.; GUO, X.; MEI, L. Investigation on rejuvenation methods of aged SBS modified asphalt binder. **Fuel**, v. 279, p. 118556, 2020.

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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 095/2006-EM: Cimentos asfálticos de petróleo – Especificação do material**. Rio de Janeiro, 2006.

FONSECA, J. F.; GÓIS, T. S.; DOMINICINI, W. K. TEIXEIRA, J. E. S. L. **O estado da arte sobre o uso de reciclado de pavimento asfáltico na pavimentação no Brasil e no mundo**. ANPET, 2014.

GUERRA, T. D. **Utilização do óleo de canola para redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

Jl, J. *et al.* Effectiveness of vegetable oils as rejuvenators for aged asphalt binders. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 3, p. D4016003, 2017.

LEAL, C. L. D. **Aproveitamento do bagaço de cana de açúcar em misturas asfálticas**. (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

MARINHO FILHO, P. G. T. **Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

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>

MIRZA, M. W. **Development of a global aging system for short and long term aging of asphalt cements**. 1993. Tese de Doutorado. University of Maryland, College Park.

MORILHA JÚNIOR, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Santa Catarina, 2004.

PARK, J.; KIM, D.; WANG, Z.; LEE, J.; PARK, S. Production of biodiesel from soapstock using an ion-exchange resin catalyst. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 25, n. 6, p. 1350-1354, 2008.

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.

ROSA, A. P. G. *et al.* Análise comparativa entre asfalto modificado com borracha reciclada de pneus e asfalto modificado com polímeros. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 20, p. 31-38, 2012.

SANTOS, A. S.; LEANDRO, E. A. **Estudo da aplicação de asfalto fresado e resíduo de rocha ornamental como base e sub-base de pavimentos.** (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

Silva, C. C. V. P., Melo Neto, O. M., Rodrigues, J. K. G., Mendonça, A. M. G. D., Arruda, S. M., Lima, R. K. B.: Evaluation of the rheological effect of asphalt binder modification using *Linum usitatissimum* oil. *Revista Matéria* 27 (2022). <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0138>

SILVA, J. P. S.; FARIAS, M. M. **Estudo dos efeitos de produtos rejuvenescedores no comportamento físico, químico e reológico de ligante asfáltico envelhecido.** *Transportes*, v. 28, n. 3, p. 91-102. 2020. Disponível em: <<https://revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1874>>. Acesso em: 04 mai. 2022.

SPECHT, Luciano Pivoto *et al.* Utilização de material fresado como camada de pavimento: estudo laboratorial e aplicação em campo. **42ª Reunião Anual de Pavimentação. Rio de Janeiro: ABPv**, 2013.

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.

SUZUKI, K. A. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de matéria fresado.** Dissertação (Mestrado em Ciências). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

TORRES, Paulo Roberto Barreto *et al.* Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas modificadas com a adição de óleo vegetal residual. **TRANSPORTES**, v. 30, n. 1, p. 2585-2585, 2022.

YILDIRIM, Y. Polymer modified asphalt binders. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 1, p. 66-72, 2007.