



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA – UEPB  
CAMPUS VIII  
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE – CCTS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**JOSÉ LUCAS DA SILVA CASTRO**

**INVESTIGAÇÃO REOLÓGICA DE LIGANTE ASFÁLTICO COM BORRA DO  
ÓLEO DE SOJA SECA PARA USO EM MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS**

**Araruna – PB**

**2022**

**JOSÉ LUCAS DA SILVA CASTRO**

**INVESTIGAÇÃO REOLÓGICA DE LIGANTE ASFÁLTICO COM BORRA DO  
ÓLEO DE SOJA SECA PARA USO EM MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS**

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

**Área de concentração:** Pavimentação.

**Orientador:** Prof. Me. Osires de Medeiros Melo Neto

**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.

C354i Castro, Jose Lucas da Silva.  
Investigação reológica de ligante asfáltico com borra do óleo de soja seca para uso em misturas asfálticas recicladas [manuscrito] / Jose Lucas da Silva Castro. - 2022.  
52 p.

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. Propriedades. 3. Viscosidade. I. Título  
21. ed. CDD 625.85

JOSÉ LUCAS DA SILVA CASTRO

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

**Área de concentração:** Pavimentação.

Aprovado em: 16/12/2022.

**BANCA EXAMINADORA**

*Osires de Medeiros Melo Neto*

---

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

*Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro*

---

Prof. Dra. Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro (Examinador Interno)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

*Albaniza Maria da Silva Lopes*

---

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

**Araruna – PB**

**2022**

À minha base familiar, por nunca ter  
desacreditado do quão longe eu poderia chegar,  
dedico.

## AGRADECIMENTOS

A Deus e Maria Santíssima, por saber que nunca estive sozinho, e que os planos dEle para mim são maiores que os meus.

À minha mãe Marilene Castro, por sempre ter dedicado total esforço para que eu pudesse ter apressado pela educação e permitir que eu pudesse sonhar chegar onde cheguei. Por todos os valores e ensinamentos repassados de como ser um grande ser humano.

Ao meu pai Luis Carlos, por sempre torcer, acreditar e apoiar meus sonhos, ensinando sempre o quão longe a educação poderia me levar.

Ao meu irmão Lisandro Castro, por todo apoio cedido e pela boa companhia que sempre alegraram meus dias.

Aos meus padrinhos (*in memorian*), Ana Lucia e Pedro por todo o incentivo, amor, carinho e sempre estarem presentes durante o meu crescimento.

À minha avó Maria Aparecida (*in memorian*) por todas as conversas após a escola, pela atenção e os ensinamentos cedidos presente à sua companhia.

À minha tia Socorro Castro, por sempre ter sido meu segundo exemplo materno, por ter me cedido valores de vida importantes e por sempre cuidar de mim como uma mãe.

Aos meus tios Adilson Castro, Fátima Castro e Analice Maria de Jesus por toda a confiança e apoio financeiro para que eu pudesse concluir minha graduação.

Ao meu primo Adson Michael, por sempre ter estado ao meu lado desde os primeiros passos até os dias de hoje, por ter lutado pela minha oportunidade de se formar Engenheiro Civil, por ser meu grande companheiro nessa caminhada e por toda a minha vida.

Ao professor e orientador Osires de Medeiros Melo Neto, pelos ensinamentos em sala de aula ao decorrer das disciplinas ministradas, por ter aceitado me orientar no desenvolvimento do trabalho de conclusão, por todo o esforço em atender e auxiliar de acordo com minhas dificuldades.

Ao meu professor do ensino médio Eudes Henrique, pelos ensinamentos em sala de aula, pelo auxílio no meu desenvolvimento pessoal e também como aluno, por confiar na minha capacidade de seguir o meu sonho.

Aos professores do curso de Engenharia Civil da UEPB, Campus VIII. E em especial, Alan Cavalcanti, Clésio Lima, Igor Ogata, Leonardo, Luísa Eduarda, Karina Fernandes, Maria Adriana e Valdecir, por contribuírem com seus ensinamentos e pelos vínculos criados dentro da sala de aula.

Aos meus amigos de graduação Alberto Oliveira, Elisângela Lima e Maria Luíza por ter compartilhados os melhores momentos durante os 5 anos de curso, por toda a irmandade, amor, carinho e apoio nos momentos difíceis. Vocês foram essenciais na minha trajetória acadêmica.

Aos meus amigos do “Residencial Amados”, Brenda Bessa, Iara Evelyn, Liliane Silva, Márcio de Lima, Pedro Anderson, Rafael Pimenta e Romário Dantas, por tornarem a reta final do curso mais agradável, por todo o apoio, pelo respeito, pelas fofocas e por cada risada compartilhada, vocês tornaram meus dias melhores e mais fáceis de suportar.

À Pilares Consultoria Júnior, por toda a experiência profissional durante o meu processo de graduação, pelas amizades feitas e pelo sentimento de dever cumprido em comemorar nossas vitórias todos os anos à cada meta batida.

À minha família EJC, Diana Farias, Emanuel Barbosa, Emília Virgínia, Estefânia Adélia, Geane Araújo, Jordeles Alves, Jonas Damião, Lucas Eduardo, Maria Júlia, Nathalia Kyssia, Nazaré Oliveira e Wesley Vitor, por todo o apoio espiritual durante a minha caminhada.

Aos meus amigos de longa data, Daniela Macedo, Ingrid Luana, Rafael Raiz, Samira Maria, Thaís Lídice e Victor Rocha, por cada palavra de apoio, momento de desabafo, risada e momentos compartilhados, e por nunca deixarem de se fazer presentes.

Ao TDS, Adson Lucas, Andrew Diego, Diego Marinho, Heron Nathan, Isack Bruno, João Neto, José Pedro, Lucas Alves, Nathan Ysloan, Paulo Emanuel, Tawan Roberto e Vinícius Marques, pelos momentos de alegria e descontração essencial para suportar rotinas exaustivas.

À Elaine Rafaelly e Gabriela Oliveira por estarem em um lugar importante ao meu lado me ouvindo e me ajudando a superar dificuldades que eu não superaria sem o apoio e de vocês, por cada palavra de carinho e conforto, por estarem presentes nessa etapa importante da minha vida mesmo estando distantes fisicamente.

À Isabela Tainá, por sempre ter me dado a força que precisei para continuar, por sempre ter sido presente quando precisei, por todas vezes que confiou na minha capacidade e me lembrou do quanto sou capaz, por cada palavra de amiga de alívio, por todas as noites que

passou acordada me apoiando durante rotinas de estudos exaustivas, por ter cuidado de mim durante grande parte do processo, se estou aqui hoje também é mérito do teu apoio.

Aos meus colegas da turma 15 por ter feito parte do meu caminho e ter tornado o processo de graduação mais leve e agradável.

A todos que participaram diretamente ou indiretamente da minha caminhada acadêmica, meu muito obrigado por toda contribuição.

À Universidade Estadual da Paraíba, por me acolher durante 5 anos e fazer parte da realização de um sonho de infância.

À Universidade Federal de Campina Grande, por permitir o uso do laboratório de Engenharia de Pavimentos para a realização dos ensaios da minha pesquisa.

À Cordilheira, pelo ligante asfáltico fornecido para a realização dos ensaios.

À IMCOPA, pela borra do óleo de soja fornecida para a realização dos ensaios.



*“Você pode sonhar, criar, desenhar  
e construir o lugar mais maravilhoso do  
mundo, mas é necessário ter pessoas para  
transformar seu sonho em realidade!”*

***Walt Disney***

## RESUMO

O modal rodoviário é o principal meio de transporte de pessoas e de mercadorias no país, contando com um imenso crescimento no trânsito de veículos. Devido a isso, é comum que ocorra um desgaste acelerado e conseqüentemente uma maior demanda por reparos nas estradas. No decorrer destes reparos uma quantidade significativa de resíduos é gerada, os quais demonstram grande potencial de reciclagem. Este material reciclado é denominado pela nomenclatura inglesa de *Reclaimed Asphalt Pavemente* (RAP). No entanto, para a reutilização deste material é necessário que ocorra a recuperação de suas propriedades e a aplicação de técnicas capazes de tornar o RAP um material trabalhável, surgindo assim a proposta dos agentes rejuvenescedores. Esta análise experimental, baseou-se no estudo reológico do ligante asfáltico com penetração 50/70 modificado pela borra do óleo de soja nos teores de 7% e 9%, após processo de secagem em estufa a 65°C por 72 horas, com o objetivo de reduzir a viscosidade para o uso em misturas asfálticas recicladas. A metodologia aplicada compreendeu a caracterização das amostras de ligante por meio da realização dos ensaios de viscosidade rotacional e *performance grade* antes e após o *Rolling Thin-Film Oven* (RTFO), e por fim o ensaio de *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR). Os resultados mostraram que aplicação da borra do óleo de soja seca gerou um ganho de viscosidade no ligante asfáltico, indo contra a proposta que motivou este estudo. O modificador também não foi capaz de reduzir a temperatura de PG do ligante puro. Os ligantes asfálticos modificados se apresentaram mais suscetíveis à deformação permanente que o ligante puro. Assim, a borra do óleo de soja seca mostrou-se ser uma aplicação ineficiente quando utilizado como agente rejuvenescedor em misturas asfálticas recicladas.

**Palavras-Chave:** Reciclagem. Propriedades. Viscosidade. Agentes rejuvenescedores.

## ABSTRACT

The road modal is the main means of transporting people and goods in the country, with a huge growth in vehicle traffic. Because of this, it is common for accelerated wear to occur and consequently a greater demand for repairs on the roads. During these repairs, a significant amount of waste is generated, which demonstrates great potential for recycling. This recycled material is known by the English nomenclature of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). However, for the reuse of this material, it is necessary to recover its properties and apply techniques capable of making RAP a workable material, thus arising the proposal of rejuvenating agents. This experimental analysis was based on the rheological study of the asphalt binder with 50/70 penetration modified by soybean oil dregs at levels of 7% and 9%, after a drying process in an oven at 65°C for 72 hours, with the objective of reducing viscosity for use in recycled asphalt mixtures. The applied methodology comprised the characterization of the binder samples by performing the rotational viscosity and performance grade tests before and after the Rolling Thin-Film Oven (RTFO), and finally the Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) test. The results showed that the application of dry soybean oil sludge generated a viscosity gain in the asphalt binder, going against the proposal that motivated this study. The modifier was also not able to reduce the PG temperature of the pure binder. The modified asphalt binders were more susceptible to permanent deformation than the pure binder. Thus, dry soybean oil sludge proved to be an inefficient application when used as a rejuvenating agent in recycled asphalt mixtures.

**Keywords:** Recycling. Properties. Viscosity. Rejuvenating agents.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ponto de Amolecimento do CAP com adição do óleo de canola. ....	21
Figura 2 - Borra do óleo de soja in natura.....	22
Figura 3 - Benefícios gerais da reciclagem de pavimentos flexíveis.....	23
Figura 4 - Borra do óleo de soja armazenada. ....	26
Figura 5 - FTIR da borra do óleo de soja. ....	28
Figura 6 - Processo de secagem da borra do óleo de soja. ....	30
Figura 7 - Estufa rotativa para o ensaio de RTFO. ....	32
Figura 8 - Amostras para o ensaio de viscosidade rotacional. ....	33
Figura 9 - Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR). ....	34
Figura 10 - Amostras preparadas para o ensaio de MSCR. ....	35
Figura 11 - Gráfico de viscosidade por temperatura.....	39
Figura 12 - Resultados de PG para as três amostras trabalhadas: a) PG, b) PG Contínuo. ....	41
Figura 13 - Valores do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em razão da temperatura antes do RTFO....	42
Figura 14 - Índice de envelhecimento das amostras estudadas. ....	43

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Nomenclatura das amostras utilizadas na pesquisa.....	31
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grau de penetração do CAP com adição do óleo de algodão refinado. ....	20
Tabela 2 - Caracterização da borra do óleo de soja. ....	27
Tabela 3 - Resultados do ensaio de viscosidade rotacional antes e após RTFO. ....	37
Tabela 4 - Limites de viscosidade para compactação e mistura.....	40
Tabela 5 - Resultados do ensaio de Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR).....	44
Tabela 6 - Resumo dos Resultados. ....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>AASHTO</b>	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
<b>AB</b>	<i>Asphalt Binder</i>
<b>AI</b>	Índice de Envelhecimento
<b>AOCS</b>	<i>American Oil Chemists' Society</i>
<b>AR</b>	Agente Rejuvenecedor
<b>DSR</b>	<i>Dynamic Shear Rheometer</i> / Reômetro de Cisalhamento Dinâmico
<b>FTIR</b>	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>
<b>Jnr</b>	Compilância Não Recuperável
<b>LEP</b>	Laboratório de Engenharia Civil
<b>MSCR</b>	<i>Multiple Stress Creep and Recovery</i>
<b>PB</b>	Paraíba
<b>PG</b>	<i>Performance Grade</i>
<b>RAP</b>	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
<b>RTFO</b>	<i>Rolling Thin-Film Oven</i>
<b>UFMG</b>	Universidade Federal de Campina Grande
<b>BSS</b>	Borra do Óleo de Soja Seca

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>1.1Objetivos</b> .....	<b>18</b>
<i>1.1.1 Objetivo Geral</i> .....	18
<i>1.1.2 Objetivos Específicos</i> .....	18
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	19
<b>2.1 Ligantes Asfálticos</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2 Uso de óleos em ligantes asfálticos</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3 Borra do óleo de soja</b> .....	<b>21</b>
<b>2.4 Misturas asfálticas recicladas</b> .....	<b>22</b>
<b>2.5 Ponderações</b> .....	<b>24</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	26
<b>3.1 Materiais</b> .....	<b>26</b>
<i>3.1.1 Borra do óleo de soja</i> .....	26
<i>3.1.2 Ligante Asfáltico</i> .....	28
<b>3.2 Procedimento de Teste</b> .....	<b>29</b>
<i>3.2.1 Protocolo de secagem da borra do óleo de soja</i> .....	29
<i>3.2.2 Modificação do ligante asfáltico</i> .....	30
<b>3.3 Testes Experimentais</b> .....	<b>31</b>
<i>3.3.1 Rolling Thin-Film Oven (RTFO)</i> .....	31
<i>3.3.2 Ensaio Reológicos</i> .....	32
<b>3.3.2.1 Viscosidade Rotacional</b> .....	32
<b>3.3.2.2 Performance Grade (PG)</b> .....	34
<b>3.3.2.3 Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)</b> .....	35
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	37



<b>4.1 Viscosidade Rotacional.....</b>	<b>37</b>
<b>4.2 Performance Grade (PG) .....</b>	<b>40</b>
<b>4.3 Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR).....</b>	<b>44</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>48</b>
<b>5.1 Sugestões para pesquisas futuras .....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>50</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O modal rodoviário no Brasil, segundo o anuário de 2018 da Confederação Nacional do Transporte, é responsável por mais de 60% das mercadorias e mais de 90% dos passageiros transportados, sendo possível observar o vasto número de problemas com a péssima qualidade da infraestrutura presente no país, destacando-se também a grande ausência de pavimentos nas estradas.

De acordo com o método de projeto de pavimentos flexíveis seguindo a DNER-1966, os pavimentos são dimensionados com um horizonte de durabilidade de 10 (dez) anos. No entanto, é possível notar que após um curto período de atividade, defeitos como trincas devido à fadiga, o acúmulo de deformações permanentes decorrente da baixa resistência ao cisalhamento, o aumento inesperado do tráfego que não corresponde aos dados do projeto base e fatores como a má dosagem da matéria prima são fatores contribuintes pela baixa durabilidade (ODA *et al.*, 2005). Estes problemas resultam na necessidade da realização prematura de manutenção, sendo um dos fatores responsáveis pelo acúmulo abundante de resíduos sólidos.

Quando se trata da manutenção de um pavimento, ocorre a aplicação da técnica de fresagem das camadas do revestimento asfáltico, sendo este processo realizado por meio do corte da camada do pavimento de acordo com a espessura desejada, aplicando um procedimento mecânico executado a quente ou a frio (BONFIM, 2007). É importante considerar a reutilização do pavimento fresado para a composição de uma nova mistura asfáltica homogênea (SILVA, 2012).

O material removido é denominado *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), esse material demonstra grande potencial de reciclagem, o que garante redução dos custos quando empregado como agregado, e impactando diretamente na redução do impacto ambiental (SANTOS; LEANDRO, 2017). Atualmente, este é um dos grandes debates da sociedade, a necessidade e viabilização de um crescimento sustentável devido ao aparente nível de esgotamento dos recursos naturais, e um dos objetivos mais importantes do RAP é poder suprir essas necessidades (GASPAR, 2019).

No entanto, quando formada uma mistura com alto teor de RAP, chegando a ultrapassar 30%, faz-se necessário a aplicação de Agentes Rejuvenescedores (AR) que amaciem o ligante rígido, compensando a rigidez natural do RAP. Agentes rejuvenescedores como os óleos orgânicos, de origem vegetal e resíduos de óleos de plantas ganharam destaque dos

pesquisadores na atualidade, sendo conhecidos como bio-óleos e apresentaram resultados em relação à restauração das propriedades do asfalto quando trata-se de características mecânicas, como maior resistência às trincas (SANTOS; FAXINA, 2019) e a redução de viscosidade do ligante RAP.

Melo Neto (2022) investigou em seu estudo o uso da borra do óleo de soja como modificador do ligante asfáltico classificado com penetração 50/70 nos teores de 1%, 3% e 5%. O autor observou que o uso de 3% e 5% da borra do óleo de soja no seu estado natural reduziu a viscosidade do ligante asfáltico, mas não diminuiu o valor da performance grade (PG) necessário para viabilizar uma maior quantidade de RAP a ser adicionada na mistura asfáltica reciclada. A hipótese levantada pelo pesquisador foi que a borra do óleo de soja apresenta cerca de 40% de umidade, e esse elevado teor de umidade pode ter oxidado parte do ligante asfáltico no processo de modificação. Outra hipótese foi que ao adicionar 1% de borra do óleo de soja, a incorporação efetiva do material seria apenas de 0,6% pois 0,4% seria de água devido à umidade. Por fim, Melo Neto (2022) incentiva estudos com a borra do óleo de soja como modificador do ligante asfáltico em teores maiores aos estudados por ele (1%, 3% e 5%) que delimitou em valores abaixo de 10% por razões de quando ultrapassado tal valor, deixaria de ser um agente aditivo, determinado por norma.

Costa (2022) também analisou o uso da borra do óleo de soja. Entretanto, os teores utilizados pelo autor foram maiores que o da pesquisa de Melo Neto (2022). O uso de 7% e 9% da borra do óleo de soja elevou a penetração e diminuiu o ponto de amolecimento do ligante asfáltico classificado com penetração 50/70. 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 borra do óleo de soja acarretou redução na suscetibilidade à deformação permanente.

Costa (2022) aponta que o teor de umidade presente na borra pôde ter interferido na oxidação do ligante asfáltico durante o processo de envelhecimento a curto prazo, causando um aumento na rigidez do ligante asfáltico para os teores de 7% e 9%, demonstrando a necessidade da realização de um estudo após a retirada da umidade do composto modificador aferindo a sua capacidade de reduzir a viscosidade e a rigidez do RAP. Assim, a fim de preencher a lacuna da não investigação do uso da borra do óleo de soja após algum processo de secagem, este estudo analisou os efeitos do uso da borra do óleo de soja nos teores de 7% e 9%, após processo de secagem, por peso do ligante asfáltico no seu desempenho reológico.

## **1.1 Objetivos**

### ***1.1.1 Objetivo Geral***

Avaliar as características reológicas da adição da borra do óleo de soja após processo de secagem no ligante asfáltico classificado com grau de penetração 50/70 como redutor de viscosidade para uso em misturas asfálticas recicladas.

### ***1.1.2 Objetivos Específicos***

- Investigar as propriedades reológicas do ligante asfáltico modificado pela borra do óleo de soja seca nos teores de 7% e 9% antes e depois do procedimento de envelhecimento a curto prazo;
- Determinar as temperaturas de mistura e compactação do ligante asfáltico modificado;
- Analisar a viabilidade do modificador como agente de reciclagem para misturas asfálticas recicladas.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Ligantes Asfálticos**

Os ligantes asfálticos são os cimentos asfálticos, com ou sem a presença de aditivos modificadores, compostos basicamente por moléculas de hidrogênio e carbono, sendo considerados hidrocarbonetos, que possuem o betume como sua principal matéria prima. O ligante é um resíduo extraído da produção do refino do petróleo e sua fórmula pode variar a partir do tipo e da qualidade do petróleo que está sendo trabalhado durante o processo de refinação. De acordo com Whiteoak (1990), é comum que o betume sofra alterações devido à radiação ultravioleta, contato com oxigênio e variações da temperatura.

Esse tipo de matéria prima apresenta características que o enquadram como material termoplástico semi-sólido na temperatura ambiente, viscoelástico, que apresenta um comportamento sólido perante baixas temperaturas e durante um carregamento rápido e como material viscoso diante de altas temperaturas e carregamentos lentos. Além disso, é necessário que o ligante apresente maior coesão e adesão aos agregados, contando com grande resistência ao envelhecimento, susceptibilidade térmica adequada a sua faixa de temperatura para o pavimento, resistência adequada à fadiga e à deformação térmica (MOTHÉ, 2009).

Conhecidas as principais características do ligante asfáltico, o Instituto Brasileiro do Petróleo apresenta que o ligante pode ser classificado de acordo com a sua viscosidade, levando em consideração as seguintes classificações: CAP-7, CAP-20 e CAP-40. Pode-se chegar à essa classificação por meio do ensaio de penetração que se dá pela inserção de uma agulha em sentido vertical na amostra do ligante selecionado em condições específicas de massa, tempo e temperatura, seguindo a proporcionalidade de quanto maior for o grau de penetração, mais maleável é o ligante (MOTHÉ, 2009).

### **2.2 Uso de óleos em ligantes asfálticos**

Devido às técnicas de reciclagem voltadas à pavimentação, tem sido necessário o estudo e desenvolvimento de matéria que contribua para o rejuvenescimento do ligante asfáltico com o objetivo da recuperação de suas características perdidas devido ao envelhecimento (SILVA, 2005). Neste contexto, tem sido desenvolvido trabalhos que comprovam que a reutilização de

resíduos industriais provenientes de óleos de origem vegetal demonstra ser mais eficaz que óleos derivados do petróleo, conclusões essas que se baseiam em torno da aplicação de uma quantidade menor de óleo vegetal para alcançar resultados que só seriam atingidos pelos derivados do petróleo caso fossem aplicados em quantidades mais elevadas (ZAUMANIS *et al.*, 2014).

Dantas (2018) realizou o procedimento *Rolling Thin-Film Oven* (RTFO) utilizando o CAP 50/70 com a adição do óleo de algodão refinado nos teores de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6%. Após o ensaio de penetração, foi observado que com o aumento do teor da substância oleica maior se torna a capacidade de penetração. Observou-se também a diminuição dos valores de penetração após o RTFO, o que já era esperado devido ao envelhecimento do ligante (Tabela 1).

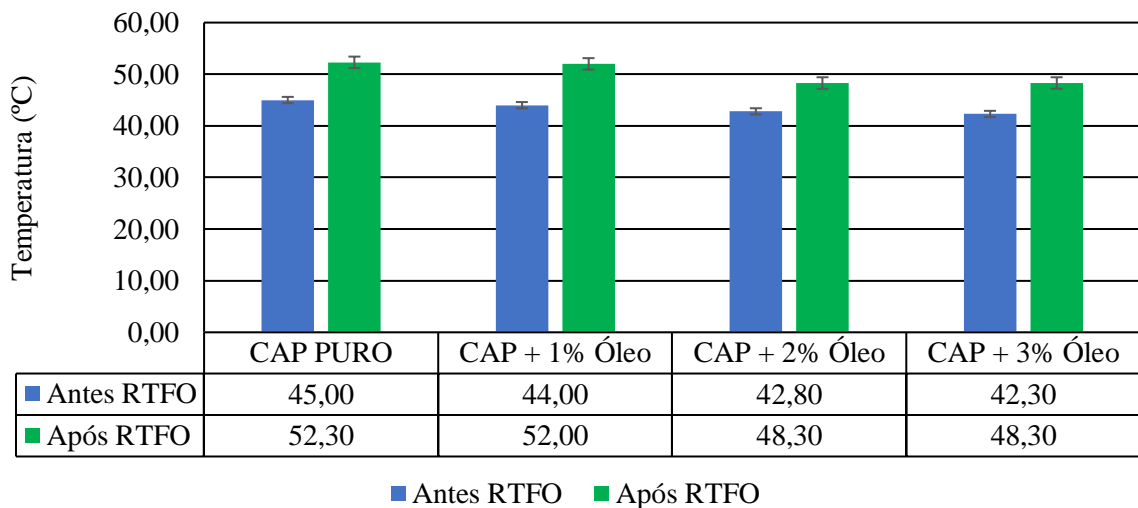
**Tabela 1** - Grau de penetração do CAP com adição do óleo de algodão refinado

Amostra	Penetração (dmm)	Penetração após RTFO (dmm)	Penetração Retida (%)
CAP 50/70	63,3	47,0	47,0
CAP 50/70 + 1% Óleo de Algodão Refinado	85,8	61,2	61,2
CAP 50/70 + 2% Óleo de Algodão Refinado	107,8	71,8	71,8
CAP 50/70 + 3% Óleo de Algodão Refinado	110,6	71,4	71,4
CAP 50/70 + 4% Óleo de Algodão Refinado	150,2	81,4	81,4
CAP 50/70 + 5% Óleo de Algodão Refinado	184,5	100,0	100,0
CAP 50/70 + 6% Óleo de Algodão Refinado	211,2	124,8	59,09
	-	-	Min. 55,00
ANP nº 19/2005			

Fonte: Dantas (2018).

Guerra (2019) fez uso do óleo de canola nos teores de 1%, 2% e 3%, confirmando que o aumento do teor de óleo garante o aumento do grau de penetração. Em seu estudo é possível observar os resultados característicos do ponto de amolecimento, onde observa-se que antes da realização do RTFO a adição do óleo em seus três níveis de teores apresentou a tendência que quanto maior o teor da adição, menor se tornaria o ponto de amolecimento do ligante misturado ao óleo de canola (Figura 1). Notou-se que após o RTFO há um ganho de rigidez devido ao envelhecimento e perda de frações aromáticas do ligante asfáltico devido à submissão a altas temperaturas.

**Figura 1** - Ponto de Amolecimento do CAP com adição do óleo de canola



Fonte: Guerra (2019).

### 2.3 Borra do óleo de soja

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) representa grande importância na economia mundial. Sua demanda apresenta alto índice de crescimento, sendo a soja uma das mais importantes *commodities* do Brasil. A extração do óleo e dos co-produtos da soja assumem sem dúvidas uma enorme demanda na indústria, pois apresentam características organolépticas que são contraindicadas na produção de alimentos (RIGO, 2015).

De acordo com a EMBRAPA, o Brasil é o maior produtor de soja no mundo, produzindo na safra de 2020/2021 cerca de 135 milhões de toneladas, números esses que torna o Brasil responsável por 37,3% da produção mundial. Portanto, se torna evidente a presença da soja na

cultura brasileira. Parte dessa produção é destinada ao consumo doméstico, sendo em sua grande maioria refinadas para atender aos padrões do mercado de forma que se torne comestível.

Segundo Araújo (2016), a borra do óleo de soja é o principal subproduto do refino do óleo de soja. Como outros produtos derivados da soja, a borra também pode ser utilizada de diversas maneiras no âmbito industrial devido ao seu alto teor de ácidos graxos, podendo ser aplicado como agente de tratamento de minérios e até como matéria prima na produção do biodiesel, fabricação de graxas e até mesmo como fertilizante. A quantidade gerada da borra a partir do refino é de algo em torno de 3,5% do óleo degomado, e dentro dessa quantidade de borra gerada ela apresenta uma composição de 23% por sais de sódio, 50% por água, 10% por fosfatídeos e 17% por óleo neutro arrastado (ZAFANELI, 2010).

**Figura 2 - Borra do óleo de soja in natura**



**Fonte:** Autor (2022).

## **2.4 Misturas asfálticas recicladas**

Cunha (2010) traz a reciclagem de pavimentos como uma alternativa já tradicional em reaproveitar os materiais originados de pavimentos desgastados, com o objetivo de adicionar como matéria prima aos novos pavimentos. Desta maneira, são pontuados alguns benefícios



gerados a partir da prática da reciclagem, sendo eles as vantagens ambientais, técnicas e econômicas (Figura 3).

**Figura 3** - Benefícios gerais da reciclagem de pavimentos flexíveis



**Fonte:** Autor (2022).

Quando se trata da reciclagem de algum material, tem-se em mente como uma resposta do combate aos problemas ambientais, porém na atualidade faz-se o destaque às soluções econômicas advindas desta prática pelo fato da reciclagem de pavimentos ser mais viável do que a aplicação de um reforço de maneira tradicional (PICADO-SANTOS; PEREIRA, 2006). Pereira e Picado-Santos (2006) realizaram um estudo de caso comparativo referente à análise da viabilidade econômica das técnicas de reciclagem, sendo esses casos aplicados na reabilitação de pavimentos flexíveis degradados:

- Primeiro caso: Comparação entre técnica de reabilitação estrutural tradicional e a técnica de reabilitação em central a quente.
- Segundo caso: Comparação entre técnica de reabilitação estrutural tradicional e a técnica de reciclagem *in situ* a frio com emulsão betuminosa.

Ambos os casos apresentaram resultados satisfatórios quanto ao ponto de vista econômico, mostrando vantagem sobre as técnicas tradicionais de reabilitação de pavimento flexível degradado. O primeiro caso, realizado por meio da técnica de reabilitação em central a quente apresentou uma redução nos custos de 30%, já no segundo caso fazendo uso da reciclagem *in situ* a frio com emulsão betuminosa, foi apresentada uma redução de 40% nos custos da reabilitação.

Uma das práticas mais comuns quando se fala de reciclagem de misturas asfálticas é o uso do RAP, que visa a redução dos impactos ambientais e atende às solicitações econômicas

vigentes da área. No entanto o uso do RAP também apresenta limitações quando trabalhado em teores superiores à 30% devido ao elevado nível de rigidez, que é característico do envelhecimento sofrido pela mistura a quente durante o processo de mistura e durante a vida útil do pavimento, tornando-se cada vez mais rígido, quebradiço e frágil ao trincamento por temperatura e por fadiga. Dessa forma, faz-se necessário o uso de agentes rejuvenescedores, responsáveis por restaurar as propriedades originais do ligante asfáltico (SANTOS; FAXINA, 2019).

Melo Neto (2022) avaliou o uso da borra do óleo de soja e o ácido graxo da borra como agentes rejuvenescedores para misturas asfálticas recicladas nos teores de 1%, 3% e 5%, avaliando e caracterizando o ligante por meio dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional e *performance grade* (PG), antes e após o processo de envelhecimento a curto prazo (RFTO) e *multiple stress creep and recovery* (MSCR). Entretanto, apenas o ácido graxo da borra do óleo de soja se mostrou viável como agente rejuvenecedor porque reduziu a *performance grade* (PG) do ligante asfáltico, viabilizando o uso de 40% de RAP na mistura asfáltica reciclada. As misturas asfálticas recicladas com 40% de RAP e com 3% e 5% de ácido graxo confirmaram os benefícios técnicos, ambientais e econômicos.

## 2.5 Ponderações

De acordo com o que foi analisado na literatura, tem-se que o ligante asfáltico é um recurso não renovável, proveniente do resíduo da produção do refino do petróleo, sabendo disto técnicas de reutilização e renovação do ligante têm sido estudadas. Partindo desta ideia, Silva (2005) expôs a necessidade de tais técnicas com o intuito de resgatar as propriedades primordiais do pavimento envelhecido.

Com isso, analisou-se a aplicação de óleos vegetais utilizados como ARs (agentes rejuvenescedores) que apresentam desempenho satisfatório quando comparados aos óleos de origem do petróleo (ZAUMANIS *et al.*, 2014). Dantas (2018) e Guerra (2019) realizaram estudos sobre diferentes óleos vegetais (óleo de algodão refinado e óleo de canola) como modificadores redutores de viscosidade, mas que alcançaram objetivos e resultados semelhantes no ligante asfáltico.

A borra do óleo de soja por sua vez se destaca devido à alta produção nacional e mundial da soja e seus diversos fins. Este material interessa estudos e pesquisas quanto ao seu uso devido à rica presença de ácidos graxos, sendo também o principal subproduto do refino, que é extraído em abundância do óleo de soja (ARAÚJO, 2016).

Então, de acordo com o que foi levantado em estudos sobre a reutilização de pavimentos desgastados, é visto que por meio de técnicas de rejuvenescimento é possível obter benefícios técnicos, ambientais, econômicos (CUNHA, 2010). O RAP possui importante presença neste âmbito, mas quando utilizado em teores elevados (>30%) depende de substâncias que auxiliem seu manuseio como a adição de agentes rejuvenescedores.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico se refere aos materiais utilizados no preparo das amostras do ligante asfáltico modificado estudado, e desenvolvido de acordo com a descrição de técnicas e experimentos aplicados na avaliação do caráter reológico do ligante asfáltico com a borra do óleo de soja após o processo de secagem. O processo de secagem da borra do óleo de soja e a 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

Nesta pesquisa, a borra do óleo de soja foi o material utilizado como aditivo para o ligante asfáltico com penetração 50/70. É um subproduto proveniente do refino do óleo de soja e foi adquirido pela empresa IMCOPA, situada no estado do Paraná, Brasil. A Figura 4 apresenta uma amostra da borra do óleo de soja natural (antes do processo de secagem).

**Figura 4** - Borra do óleo de soja armazenada



Fonte: Autor (2022).

A empresa IMCOPA disponibilizou a amostra para o estudo sem os dados característicos da borra. Este material foi o mesmo utilizado nos estudos de Melo Neto (2022), Costa (2022) e Oliveira Neto (2022). A caracterização da borra do óleo de soja foi realizada seguindo as normas da *American Oil Chemists' Society* (AOCS), conforme observados na Tabela 2.

**Tabela 2** - Caracterização da borra do óleo de soja

<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Norma</b>
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:** Autor (2022).

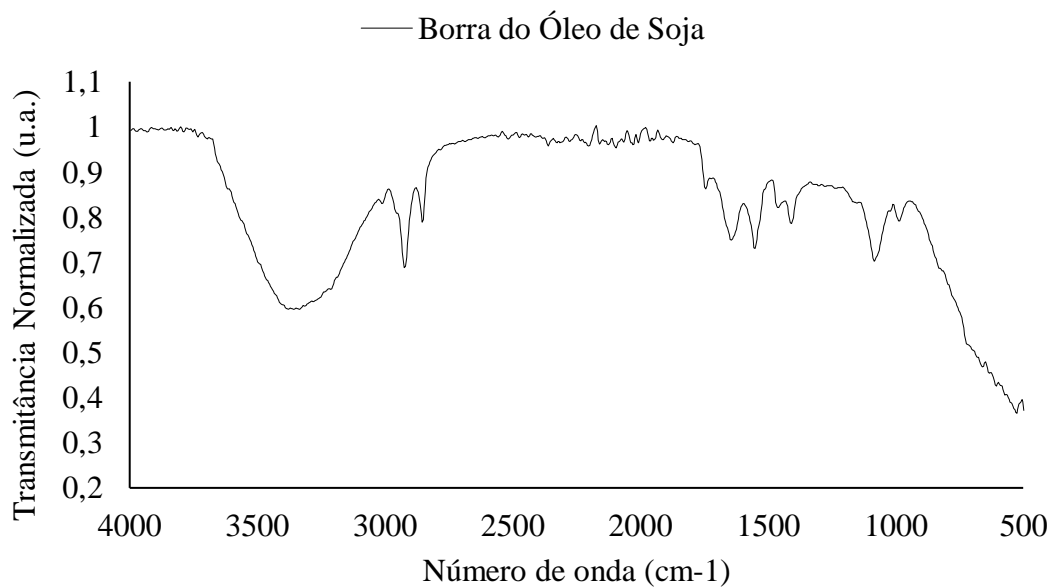
De acordo com a Tabela 2, observa-se que o teor total de ácidos graxos está entre 35% a 50%, limites esses estabelecidos por Swern (1982). A umidade obtida foi de 41,85% da composição, podendo influenciar diretamente no processo de mistura com o ligante. Como a umidade apresentou mais de 40% do aditivo, este estudo traz a proposta da remoção desta umidade por meio do aquecimento em estufa na temperatura de 65°C na duração de 72 horas, antes de utilizar a borra como aditivo. A análise do pH a 25°C deu a possibilidade de verificar o grau de alcalinidade do material, apresentando valor acima de 7 e se classificando como básico ou alcalino.

Melo Neto (2022) também realizou o teste de *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), técnica espectroscópica que ocorre de forma que o espectro obtido é dado a partir de uma faixa de comprimentos de ondas e um interferômetro, regido pela norma ASTM D 7653:2018, com o objetivo de obter as características químicas da amostra através da divisão dos grupos funcionais presentes. O espectro obtido apresenta modos e combinações vibracionais de grupos funcionais dos ácidos graxos presentes na composição química da borra do óleo de soja, expondo bandas de absorção na região de 3.010 cm<sup>-1</sup> a 2.800 cm<sup>-1</sup>,

correspondentes às vibrações de deformação axial de ligações C-H de grupamentos metila ( $\text{CH}_3$ ), metileno ( $\text{CH}_2$ ) e das ligações duplas ( $=\text{C}-\text{H}$ ).

As bandas com intensidade intermediária presentes na região de  $1.743 \text{ cm}^{-1}$  a  $1.404 \text{ cm}^{-1}$  correspondem a vibração de deformação axial do grupo carbonila ( $\text{C}=\text{O}$ ) presente nos grupos ésteres constituintes dos triacilglicerídeos. A presença de bandas de forte absorção na região de  $1.080 \text{ cm}^{-1}$  a  $987 \text{ cm}^{-1}$ , são atribuídas às vibrações de deformação axial da ligação  $\text{C}-\text{O}$  de ésteres constituintes dos triacilglicerídeos. Assim, devido à presença dessas bandas que não estão presentes no ligante asfáltico AB, pode-se inferir que o material atue como um antioxidante. A Figura 5 apresenta o espectro obtido pelo FTIR para a borra do óleo de soja.

**Figura 5** – FTIR da borra do óleo de soja



Fonte: Melo Neto (2022).

### 3.1.2 Ligante Asfáltico

O ligante analisado nesse estudo foi concedido pela empresa Cordilheira, de Campina Grande – PB, classificado com penetração 50/70 e uma temperatura máxima de PG de  $64^\circ\text{C}$ . O tipo de ligante foi escolhido devido sua alta frequência de aplicação na região Nordeste do Brasil.

## 3.2 Procedimento de Teste

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

Melo Neto (2022) e Costa (2022) realizaram estudos físicos empíricos e reológicos do ligante asfáltico modificado com a borra do óleo de soja, nos teores de 1%, 3%, 5%, 7% e 9%, na sua condição natural sem nenhum processo de tratamento, buscando teores que se mantivessem intervalados e inferiores à 10% para serem considerados agentes aditivos. 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 na Figura 6. 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:

- 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.
- 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.
- O protocolo foi cessado após completar 72 horas de procedimento de secagem, pois foi percebida uma retirada 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 6** - Processo de secagem da borra do óleo de soja



**Fonte:** Autor (2022).

### 3.2.2 Modificação do ligante asfáltico

O ligante asfáltico, denominado do inglês *Asphalt Binder* (AB), passou por um processo de modificação visando analisar o seu comportamento reológico em diferentes teores da adição da borra do óleo de soja seca, sendo esses teores de 7% e 9%, visando complementar o estudo realizado por Costa (2022) e Melo Neto (2022). Nesta etapa foi utilizado um agitador mecânico



FISATOM, modelo 722D, para realizar o processo de mistura. O processo seguiu os seguintes passos:

- (1) O ligante foi inserido na estufa a 135°C em um processo de pré-aquecimento por aproximadamente 90 minutos com o objetivo de atingir a fluidez exigida para que aconteça a homogeneização.
- (2) Com o auxílio de um béquer, a mistura foi posta em um agitador mecânico com uma rotação de 600 rpm com objetivo de homogeneizar a distribuição da mistura.
- (3) Após atingir a temperatura de estabilização de 140°C, foi realizada a inserção dos aditivos, separadamente em suas proporções pelo peso do ligante puro e assim elevando as rotações para 1000 rpm, permanecendo a amostra nesse processo por 30 minutos para a homogeneização da mistura, em teores de 7 e 9%.

Essa técnica foi baseada nos estudos de Melo Neto (2022) e Costa (2022), e o Quadro 1 apresenta a descrição das amostras utilizadas na pesquisa e suas respectivas nomenclaturas.

**Quadro 1** - Nomenclatura das amostras utilizadas na pesquisa

<b>Amostras</b>	<b>Nomenclaturas</b>
Ligante asfáltico com penetração 50/70	AB
AB + 7% da borra do óleo de soja seca	7% BSS
AB + 9% da borra do óleo de soja seca	9% BSS

**Fonte:** Autor (2022).

### 3.3 Testes Experimentais

#### 3.3.1 *Rolling Thin-Film Oven (RTFO)*

Seguindo a norma ASTM D2872: 2019, o ensaio RTFO é realizado com o objetivo de simular o envelhecimento que ocorre com a matéria prima durante o processo de mistura do ligante asfáltico em um curto prazo, sendo este um dos processos de envelhecimento laboratorial um dos mais utilizados.

Realizado por meio de um condicionamento em estufa trabalhando com amostras padronizadas do ligante, dispostas em frascos de vidro e em uma prateleira vertical rotativa com jatos de ar por 85 minutos em uma temperatura de 163°C, com o objetivo de provocar oxidação e volatilização de componentes leves, interpretando o que acontece nas etapas de usinagem até a compactação do ligante *in loco* (Figura 7).

**Figura 7** - Estufa rotativa para o ensaio de RTFO



**Fonte:** Autor (2022).

### 3.3.2 Ensaios Reológicos

Para a execução dos ensaios reológicos foram utilizadas amostras em duplicatas, a fim de obter a média e o resultado ser mais representativo.

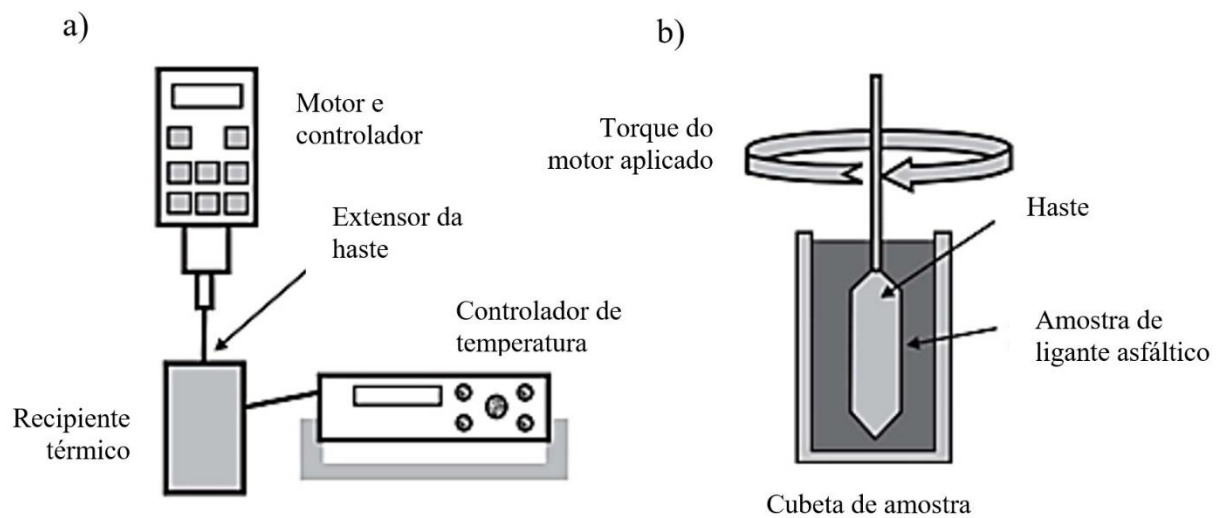
#### 3.3.2.1 Viscosidade Rotacional

O ensaio de viscosidade rotacional foi baseado na norma ASTM D4402: 2015. Conhecido também como *Brookfield*, devido ao nome dado ao viscosímetro utilizado no ensaio. Este ensaio permite a identificação da viscosidade e a consistência do ligante.

Para a execução deste ensaio foi colocada a amostra do ligante em um recipiente que possui a temperatura controlada e em seguida, o eixo com rotação e velocidade também regulada é inserida dentro do recipiente onde está contida a amostra, sendo obtido o valor da

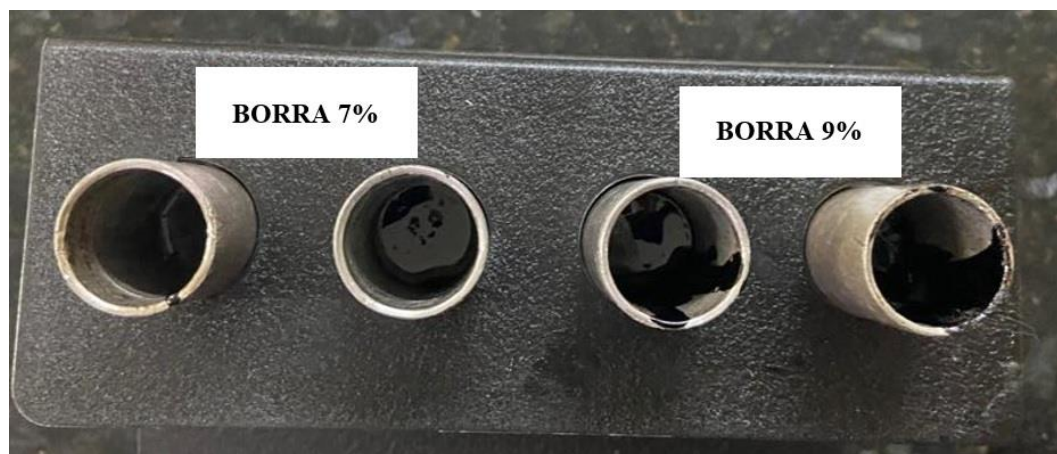
viscosidade rotacional a partir do valor aplicado de toque no eixo. A partir da rotação registrada durante o experimento, determina-se a força exigida para vencer a resistência derivada da viscosidade oferecida pelo material ao movimento de rotação. A Figura 8 apresenta o esquema do equipamento e do eixo, utilizados no ensaio de viscosidade rotacional, enquanto na Figura 9 é possível identificar as amostras em diferentes teores de borra seca antes da realização do ensaio.

**Figura 8** – 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 9** – Amostras para o ensaio de viscosidade rotacional

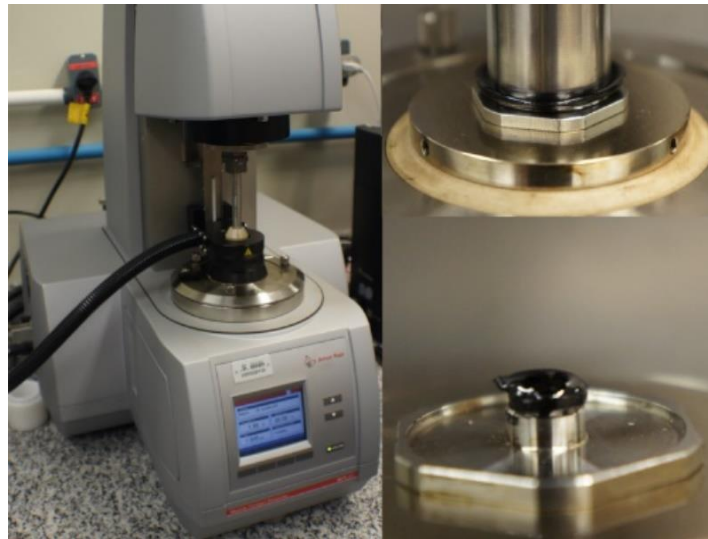


**Fonte:** Autor (2022).

### 3.3.2.2 Performance Grade (PG)

Para o ensaio de PG, seguiu-se as diretrizes da norma ASTM D6373: 2021. Este ensaio faz uso do reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) visto na Figura 10, e tem como objetivo a determinação da temperatura máxima que o ligante consegue manter a resistência após sofrer deformação permanente, sendo observado que os ligantes asfálticos mais viscosos apresentam maiores valores de PG quanto 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 10 apresenta o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) utilizado nesse estudo.

**Figura 10 - Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR).**



**Fonte:** Stratura Asfaltos, 2022.

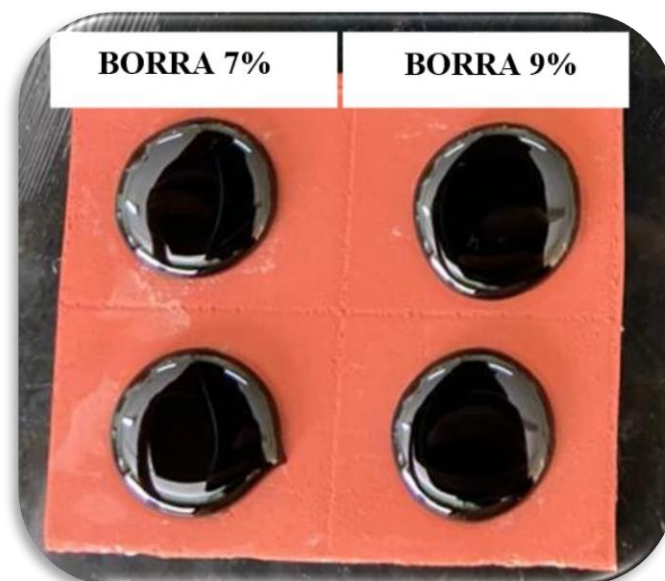
Ao decorrer da execução do ensaio, foi analisado o parâmetro  $G^*/\sin\delta$  responsável por aferir a rigidez do material, tomando início na temperatura de 46°C, e elevando a temperatura em intervalos de 6°C posteriormente, sendo a temperatura máxima obtida após ultrapassar o ponto de falha durante o experimento. Então, de posse de todos os dados do ensaio com as amostras antes e após o RTFO, foi possível calcular o índice de envelhecimento (AI) de acordo com a Equação (1).

$$IA = \frac{G^*/\text{sen}\delta_{\text{Pós-RFTO}}}{G^*/\text{sen}\delta_{\text{Pré-RFTO}}} \quad \text{Equação (1)}$$

### 3.3.2.3 Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

O ensaio de MSCR foi realizado baseado pela norma ASTM D7405: 2020. Este ensaio também faz uso do reômetro de cisalhamento dinâmico, sendo realizado através da aplicação de 20 ciclos de carregamento, sendo os 10 primeiros ciclos sob a tensão de 0,1 kPa e os demais sob 3,2 kPa de tensão, com o objetivo de encontrar o percentual de recuperação elástica (%R), a compilação não-recuperável (Jnr) do ligante asfáltico e a diferença percentual entre as compilações não-recuperáveis de 0,1 kPa e 3,2 kPa (Jnr<sub>diff</sub>). O ensaio decorreu na temperatura de PG do ligante asfáltico, com a intenção de comparar as amostras do ligante asfáltico puro e o ligante modificado. O ensaio aponta que ligantes asfálticos mais viscosos (rígidos) apresentam valores de Jnr a 3,2 kPa menores, enquanto ligantes mais fluidos apresentam valores maiores. A Figura 11 apresenta amostras preparadas para o ensaio de MSCR. Vale ressaltar que esse ensaio é realizado apenas com amostras submetidas ao envelhecimento RTFO, conforme a norma ASTM D7405: 2020.

**Figura 11 - Amostras preparadas para o ensaio de MSCR.**



Fonte: Autor (2022).

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 3 foi utilizada para classificação dos ligantes asfálticos puro e modificados, conforme a norma AASHTO M320:2017.

**Tabela 3** – Classificação de nível de carregamento do pavimento com base nos valores de Jnr

<b>PROPRIEDADE</b>	<b>JNR (kPa<sup>-1</sup>)</b>	<b>TIPO DE TRÁFEGO</b>	<b>NÚMERO DE PASSADAS EM UM EIXO PADRÃO</b>
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 (2017).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são abordados os resultados e discussões referentes aos ensaios reológicos realizados durante o estudo de avaliação do ligante asfáltico modificado com a adição da borra do óleo de soja seca após o processo de secagem.

### 4.1 Viscosidade Rotacional

A Tabela 4 apresenta os resultados médios obtidos no ensaio de viscosidade rotacional. Observa-se que ocorreu um aumento de viscosidade para o ligante modificado com 7% e 9% de borra de óleo de soja seca em quase todas as temperaturas em relação à amostra pura, antes e após RTFO. Observou-se redução apenas entre os teores de 7% para 9% na temperatura de 177°C antes do RTFO. Ou seja, a adição da borra do óleo de soja seca nos teores propostos não permitiu redução da viscosidade do ligante asfáltico, o que se contrapõe ao objetivo inicial central da pesquisa.

**Tabela 4 - Resultados do ensaio de viscosidade rotacional antes e após RTFO.**

<b>Antes RTFO</b>			
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>AB</b>	<b>7%BSS</b>	<b>9%BSS</b>
135	401,00	674,57	879,34
142	284,00	376,1	526,26
150	198,00	248,47	251,52
165	120,00	125,83	126,55
177	73,00	119,61	115,16
<b>Após RTFO</b>			
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>AB</b>	<b>7%BSS</b>	<b>9%BSS</b>
135	548,00	705,53	974,5
142	391,00	477,65	625,73
150	269,00	326,60	418,78
165	144,00	173,68	229,43
177	94,00	114,25	155,42

**Fonte:** Autor (2022).

O ganho de viscosidade ao ter adicionado a borra do óleo de soja seca permite apontar um ganho de rigidez no ligante asfáltico, indo contra à hipótese que motivou o estudo, que foi a redução da rigidez do ligante. Os valores obtidos nesse estudo são superiores aos apresentados por Costa (2022). A Tabela 5 apresenta o ganho em porcentagem (%) de viscosidade em relação ao estudo de Costa (2022). O aumento foi significativo, principalmente para a amostra 9%BSS nas menores temperaturas de ensaio (135°C e 142°C). Assim, pode-se apontar que o processo de secagem influenciou de forma negativa quanto ao propósito do estudo, aumentando a rigidez do ligante asfáltico.

**Tabela 5** – Ganho de viscosidade em relação ao estudo de Costa (2022)

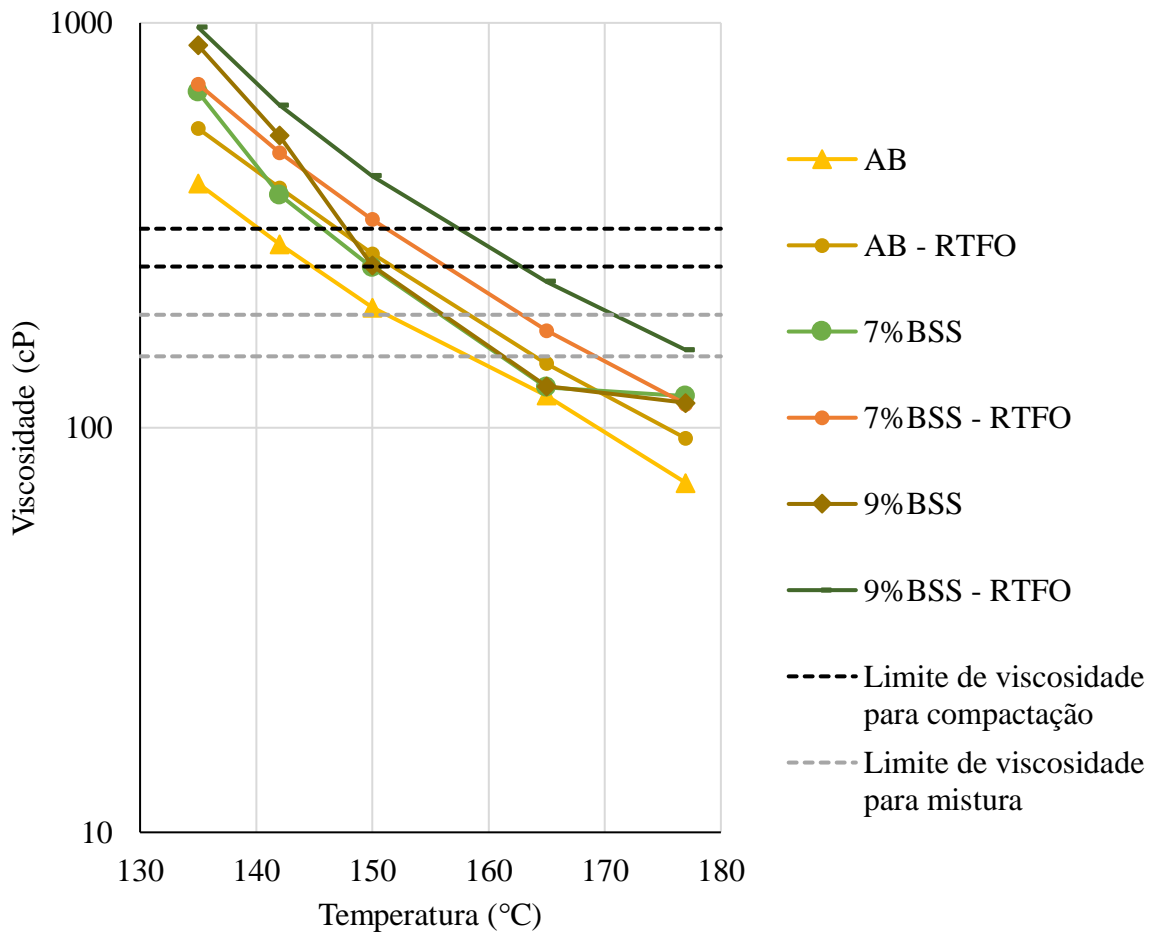
<b>Antes RTFO</b>		
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>7%</b>	<b>9%</b>
135	57.33%	97.05%
142	23.03%	87.95%
150	17.76%	37.82%
165	5.17%	22.09%
177	14.19%	59.39%
<b>Após RTFO</b>		
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>7%</b>	<b>9%</b>
135	26.27%	64.13%
142	22.47%	50.52%
150	20.07%	46.17%
165	15.79%	48.98%
177	10.65%	56.20%

**Fonte:** Autor (2022).



Na produção de misturas asfálticas a temperatura de projeto do ligante deve ser de  $0.17 \pm 0.02$  Pa.s para os ligantes convencionais que são analisados no viscosímetro rotacional. A partir da Tabela 4 foi possível traçar o gráfico de viscosidade por temperatura, como apresentado na Figura 12, onde pôde-se cruzar os valores limites de temperatura de compactação e de mistura.

**Figura 12** - Gráfico de viscosidade *versus* temperatura



**Fonte:** Autor (2022).

A Tabela 6 apresenta as temperaturas de compactação e mistura das amostras analisadas a partir da análise gráfica da Figura 12. De acordo com os resultados, observou-se que quanto maior o teor da borra de óleo de soja seca no ligante, maior é o aumento de temperatura de compactação em comparação às amostras do ligante puro, sendo este aumento de temperatura de compactação da amostra do ligante puro para as amostras de 7% BSS e 9% BSS de 5°C (3,5%) e 6,5°C (4,56%) respectivamente. E para as temperaturas de mistura ocorreu um aumento de 4°C (2,58%) e 5°C (3,22%) para os ligantes 7%BSS e 9%BSS, respectivamente.

**Tabela 6** - Limites de viscosidade para compactação e mistura

<b>Antes RTFO</b>				
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	152 - 158	155
7%BSS	146 - 149	147,5	156 - 162	159
9%BSS	148 - 150	149	157 - 163	160

**Fonte:** Autor (2022).

Diferente do estudo de Costa (2022) que trabalhou com a borra *in natura*, a borra seca apresentou aumento das temperaturas de mistura e compactação do ligante asfáltico, tornando-se uma opção inviável quando comparada com a borra *in natura*, exigindo maior consumo de energia durante o processo de mistura e resultando em maior emissão de mais gases (CO<sub>2</sub>) nas usinas asfálticas.

#### **4.2 Performance Grade (PG)**

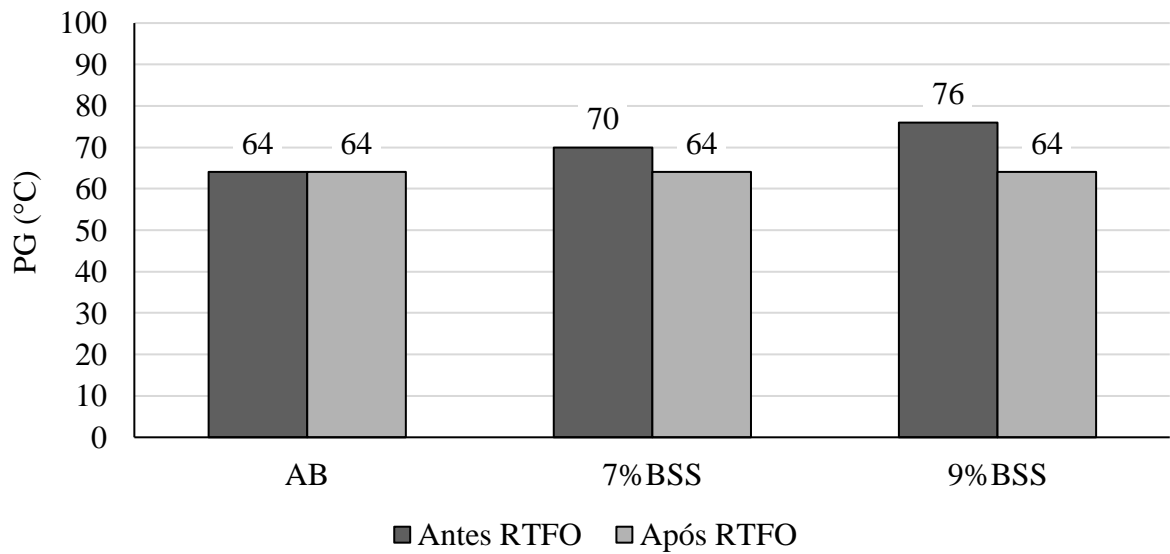
Os valores de PG representam a faixa de temperatura máxima e mínima de utilização do ligante, visto que os resultados encontrados responsáveis por determinar a temperatura mínima de PG foram descartados em virtude do Brasil apresentar clima tropical, onde as chances de que ocorram temperaturas negativas são irrisórias.

Na Figura 13 estão representados os resultados das temperaturas de PG e PG contínuo do uso do ligante asfáltico antes e após o processo de RTFO. Analisando os dados, notou-se que após a adição de 7% de BSS no ligante puro, elevou seu PG em 7°C e após o RTFO apresentou redução na temperatura de PG de 6,3°C. Para a adição de 9% de BSS ocorreu um aumento no PG de 10°C, chegando a cair 10,8°C após o processo de RTFO. O comportamento de diminuição das temperaturas de PG após RTFO é esperado, pois o envelhecimento acarreta perda de fração aromática do ligante, enrijecendo-o.

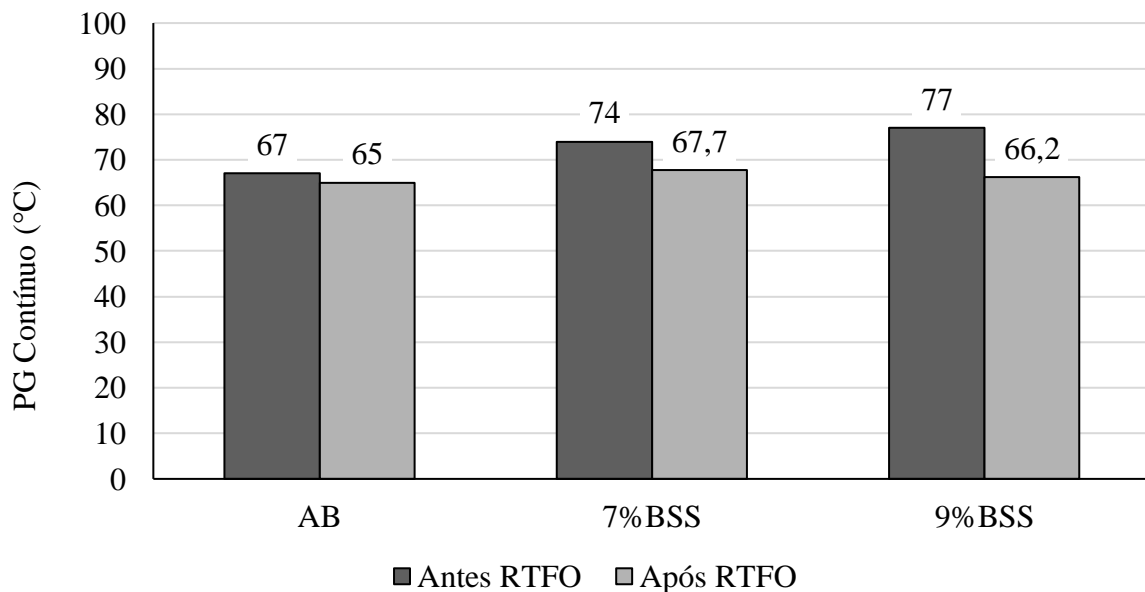
No entanto, de acordo com os estudos realizados por Costa (2022), baseado no estudo de Melo Neto (2022) esperava-se que após a secagem da borra do óleo de soja apresentasse uma redução mais eficaz no PG, eliminando a hipótese de Costa (2022) que justifica que o aumento do PG se deve ao alto teor de umidade presente na borra. Logo, de acordo com os dados coletados, o aumento no teor da borra do óleo de soja não apresentou linearidade na redução do PG como era esperado por Melo Neto (2022).

**Figura 13** - Resultados de PG para as três amostras trabalhadas: a) PG, b) PG Contínuo

a)



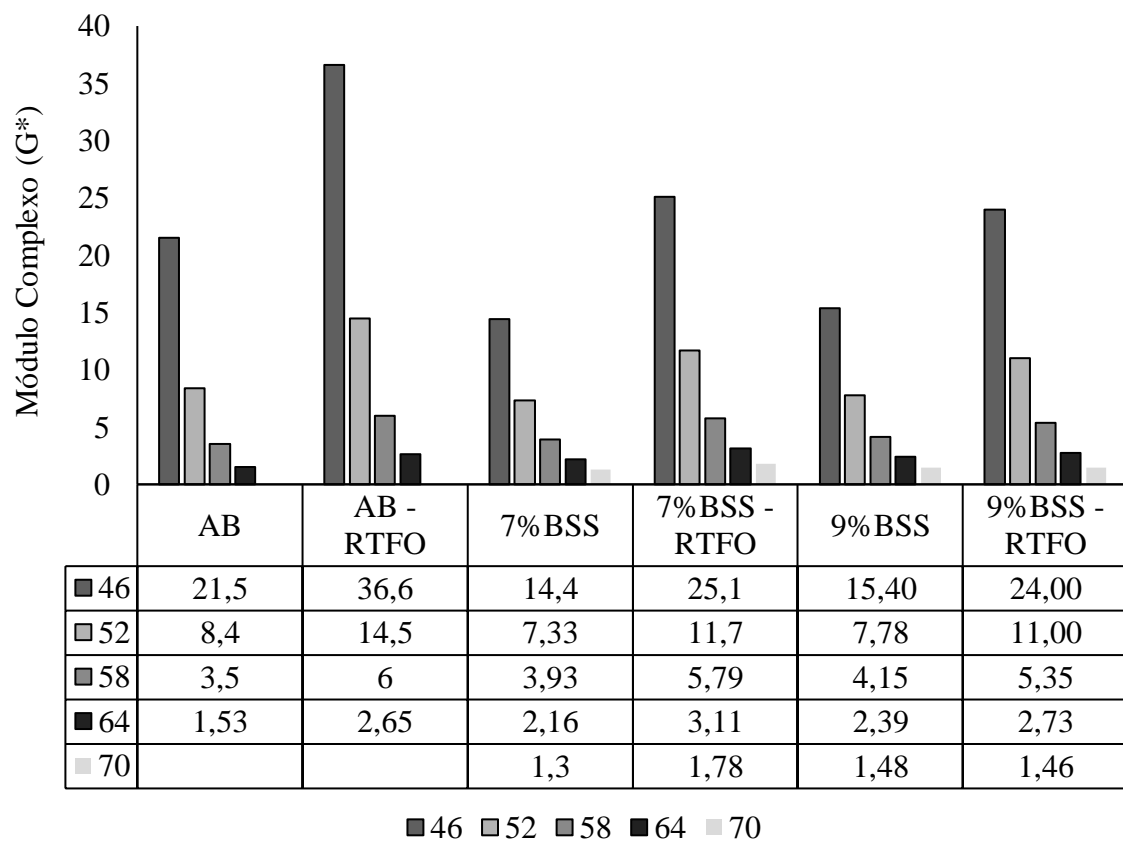
b)



Fonte: Autor (2022).

A partir da Figura 14, pode-se observar os valores da variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) para cada amostra analisada em termos de temperatura. De acordo com estes dados, antes e após o RTFO, as amostras apresentaram módulos complexos superiores com o aumento da temperatura. Ao comparar as amostras de ligante asfáltico entre si, verificou-se que as amostras de ligante asfáltico com BSS apresentaram valores de  $G^*$  inferiores à amostra de ligante puro nas temperaturas de 46°C e 52°C. Esse comportamento não corrobora com os dados de viscosidade, onde observou-se ganho de rigidez após a adição do modificador. Uma possível justificativa é a não homogeneidade das amostras, onde pode não ter ocorrido a mistura completa devido a coloração escura do ligante impossibilitar a observação da homogeneidade ao olho nu, ou seja, talvez as amostras ensaiadas não foram representativas.

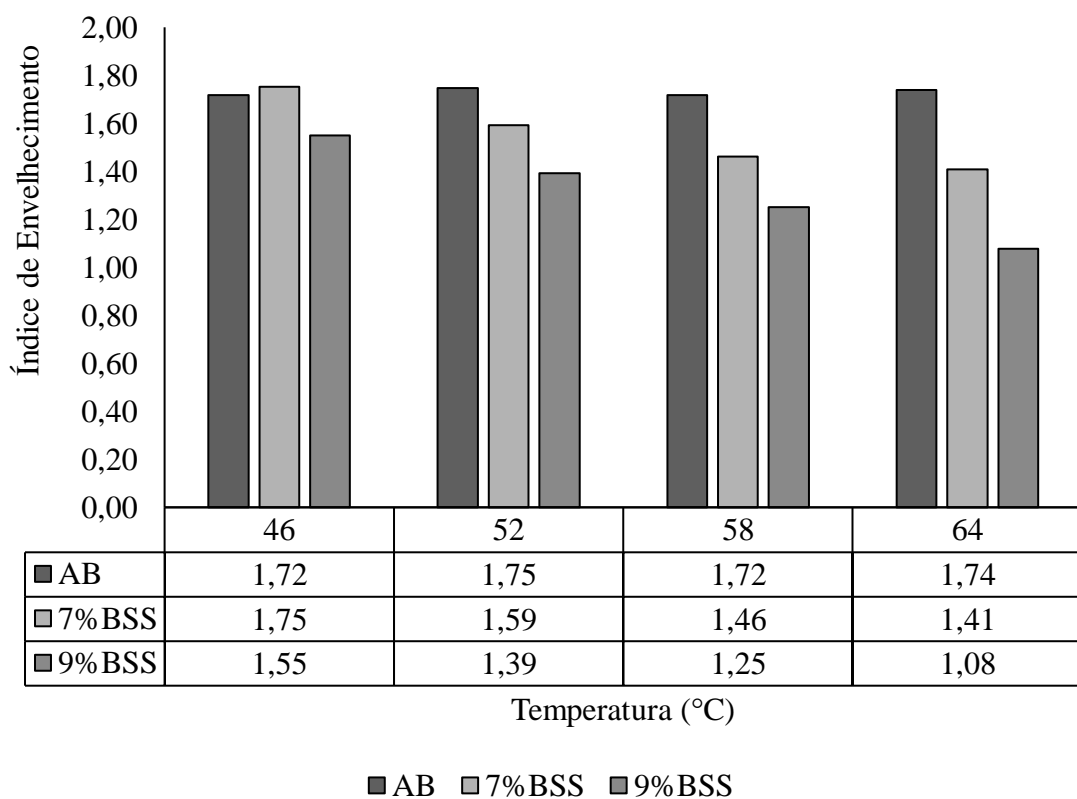
**Figura 14 - Valores do Módulo Complexo ( $G^*$ ) para os ligantes asfálticos**



Sobre a temperatura de 64°C, antes do processo de RTFO, é possível identificar que a amostra de ligante puro apresentou módulo complexo de 1,53 que se classificou como inferior ao das amostras de 7% BSS e 9% BSS que apresentaram valores do módulo complexo de 2,16 e 2,39, respectivamente. Neste caso, implica dizer que após a adição da BSS ocorre o desenvolvimento de uma rigidez maior no ligante asfáltico modificado. Quando comparado

com os dados obtidos por Costa (2022) que utilizou a borra do óleo de soja *in natura*, a borra seca ofereceu módulos complexos superiores, resultando em um ganho de rigidez após o processo de secagem da borra na temperatura de PG (64°C). Em maiores temperaturas, a BSS acarretou ganho de rigidez ao ligante asfáltico (AB). Na Figura 15 é possível identificar os valores do índice de envelhecimento (AI), identificados por meio da relação entre os parâmetros  $G^*/\sin\delta$  de cada amostra antes após o processo de envelhecimento a curto prazo (RTFO) em cada temperatura de análise dos parâmetros.

**Figura 15 - Índice de envelhecimento das amostras estudadas.**



**Fonte:** Autor (2022).

Em maior proporção, a adição da BSS ao ligante em quase todas as temperaturas provocou redução no índice de envelhecimento do ligante, que já era esperado, devido ao ligante puro ser o ligante mais rígido e que apresenta maior módulo complexo, com exceção da temperatura de 46°C. 7% BSS causou um aumento no AI na temperatura de 46°C. A maior diminuição ocorreu na temperatura de 64° onde para a adição de 7% BSS e 9% BSS provocaram redução de 18,96% e 37,93%, respectivamente. Comportamento este que pode ser justificado pela presença de frações aromáticas presente na borra do óleo de soja, conforme citado na

análise do FTIR do material. Contudo, ao comparar com os dados obtidos por Costa (2022) é possível identificar uma descontinuidade do padrão de adição de borra na temperatura de 46°C, resultado esse gerado provavelmente pela retirada de uma grande parcela da umidade realizada neste estudo.

### 4.3 Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

A execução deste ensaio viabiliza 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 a diferença percentual entre as compliâncias não-recuperáveis (Jnr<sub>diff</sub> – que fornece dados à sensibilidade ao aumento da tensão). A Tabela 7 indica os dados do ensaio MSCR realizados na temperatura de 64°C, referente à temperatura máxima de PG do ligante asfáltico puro e das amostras 7% BSS e 9% BSS.

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

Amostra	Temperatura de ensaio (°C)	Percentual de recuperação (%)		Compliâncias não recuperável Jnr (kPa <sup>-1</sup> )		Jnr, diff (%)
		0.1 kPa	3.2 kPa	0.1 kPa	3.2 kPa	
AB		5,03	0,37	3,40	3,83	12,68
7%BSS	64	33,53	3,13	1,93	4,37	125,94
9%BSS		73,95	3,4	0,531	4,37	721,54

**Fonte:** Autor (2022).

De acordo com os dados analisados referentes ao Jnr a 0,1 kPa, para as amostras de 7% BSS e 9% BSS, na temperatura de ensaio 64°C, houve uma diminuição de 43,24% para a amostra de 7% BSS e uma diminuição de 84,38% para a amostra de 9% BSS. Já para os valores de Jnr obtidos a 3,2 kPa mostraram um acréscimo de aproximadamente 14% para ambas as amostras (7% BSS e 9% BSS). O aumento nos valores de Jnr a 3,2 kPa indicam que o ligante asfáltico está mais macio, ou seja, mais fluido e suscetível à deformação permanente. Esse comportamento também não era esperado devido ao ganho de rigidez observado nos ensaios de viscosidade rotacional e PG. Outra vez se observa valores incoerentes com a literatura, o que levanta novamente a hipótese da não interação ou interação parcial da borra do óleo de soja

seca com o ligante asfáltico. Essa ausência de interação faz com que não se obtenha uma mistura homogênea e que as amostras não sejam representativas, invalidando os dados ou o material para uso na pavimentação.

Em comparação ao estudo de Costa (2022), as amostras de ligante asfáltico com borra do óleo de soja seca apresentaram ganho de rigidez em relação às amostras de ligante asfáltico com borra do óleo de soja *in natura*. A redução nos valores de  $J_{nr}$ , em relação ao estudo de Costa (2022), a 3,2 kPa foi de 17,23% e 20,41% para as amostras 7%BSS e 9%BSS, respectivamente. Esses dados corroboram com os demais ensaios realizados, confirmando o ganho de rigidez e inviabilizando o uso da borra do óleo de soja para misturas asfálticas recicladas. Contudo, essas amostras se enquadram para uso em rodovias de tráfego padrão, conforme a classificação prevista na Tabela 3, com valores dentro do intervalo de  $2,0 \text{ kPa}^{-1}$  e  $4,5 \text{ kPa}^{-1}$  que representa esta classificação.

As amostras 7%BSS e 9%BSS se apresentaram mais suscetíveis à deformação permanente do que o ligante asfáltico puro, mesmo se enquadrando no mesmo nível de classificação. Essa suscetibilidade vai contra o observado nos demais ensaios, porque demonstra maior fluidez em relação ao ligante puro, fortalecendo novamente a hipótese da não interação da borra do óleo de soja com o ligante asfáltico e as amostras não representativas. Um dos parâmetros importantes deste ensaio é a identificação do  $J_{nr_{diff}}$ , que é a medida da diferença entre o  $J_{nr}$  de 0,1 kPa e 3,2 kPa, em parâmetro de porcentagem. De acordo com a AASHTO M320 (2017), o  $J_{nr_{diff}}$  está diretamente ligado com a sensibilidade dos materiais ao aumento dos níveis de tensão e que deve permanecer abaixo de 75%.

Portanto, na temperatura de 64°C, as amostras estudadas de 7%BSS e 9%BSS são classificadas como inadequadas por apresentarem valores muito superiores à 75%, diferentemente dos resultados apresentados por Costa (2022) que trabalhou com a borra do óleo de soja nos mesmos teores sem passar pelo processo de secagem, e por Melo Neto (2022) que trabalhou com teores de 1%, 3% e 5% da borra do óleo de soja *in natura*, que atingiram valores do  $J_{nr_{diff}}$  dentro do limite aceito por norma. A Tabela 8 apresenta o resumo dos dados obtidos nos testes reológicos para as três amostras ensaiadas.

**Tabela 8 – Resumo dos resultados**

<b>Resultados</b>							
		<b>AB</b>		<b>7% BSS</b>		<b>9% BSS</b>	
Viscosidade Rotacional (cP) Antes RTFO	135 °C	401	x	674,57		879,34	
	142 °C	284	x	376,1		526,26	
	150 °C	198	x	248,47		251,52	
	165 °C	120	x	125,83		126,55	
	177 °C	73	x	119,61		115,16	
Viscosidade Rotacional (cP) Após RTFO	135 °C	548	x	705,53		974,5	
	142 °C	391	x	477,65		625,735	
	150 °C	269	x	326,6		418,785	
	165 °C	144	x	173,68		229,435	
	177 °C	94	x	114,25		155,42	
Temperatura de compactação (°C)		142,5	x	147,5		149	
Temperatura de mistura (°C)		155	x	159		160	
Performance Grade (°C) antes RTFO		67	x	74		77	
Performance Grade (°C) após RTFO		65	x	67,7		66,2	
Performance Grade Contínuo (°C) antes RTFO		64	x	70		76	
Performance Grade Contínuo (°C) após RTFO		64	x	64	x	64	x
Módulo Complexo (G*) antes RTFO	46 °C	21,5		14,4	x	15,40	
	52 °C	8,4		7,33	x	7,78	
	58 °C	3,5	x	3,93		4,15	
	64 °C	1,53	x	2,16		2,39	
Módulo Complexo (G*) após RTFO	46 °C	36,6		25,1		24,00	x
	52 °C	14,5		11,7		11,00	x
	58 °C	6		5,79		5,35	x
	64 °C	2,65	x	3,11		2,73	
Índice de Envelhecimento (AI)	46 °C	1,72		1,75		1,55	x
	52 °C	1,75		1,59		1,39	x
	58 °C	1,72		1,46		1,25	x
	64 °C	1,74		1,41		1,08	x
MSCR Jnr a 0,1 kPa		64 °C	3,4	x	1,93		0,531
MSCR Jnr a 3,2 kPa		64 °C	3,83	x	4,37		4,37

x = Melhor desempenho dentre as amostras testadas.

**Fonte:** Autor (2022).



Após a análise geral dos testes reológicos realizados, foi possível identificar maior destaque para a amostra de ligante asfáltico puro em relação às amostras 7%BSS e 9%BSS. Assim, observou-se 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 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste tópico serão apresentadas as conclusões obtidas a partir dos dados obtidos por meio das análises trabalhadas, assim como sugestões para futuras pesquisas envolvendo o mesmo objeto de estudo. A análise reológica de amostras do ligante asfáltico modificado pela borra do óleo de soja seca em teores de 7% e 9% permitiu apontar algumas conclusões:

- (1) O uso da borra do óleo de soja seca acarretou ganho de rigidez ao ligante asfáltico e aumento das temperaturas de mistura e compactação, resultando em maior consumo energético e possível emissão de CO<sub>2</sub>.
- (2) As temperaturas de PG das amostras modificadas antes do processo de envelhecimento apresentavam valores superiores em relação à amostra do ligante puro, inviabilizando sua utilização como agente rejuvenescedor para misturas recicladas.
- (3) A remoção da umidade das amostras da borra do óleo de soja contribuiu para o aumento da sensibilidade dos materiais ao aumento dos níveis de tensão, tornando assim o ligante modificado mais susceptível às deformações com o aumento de carga, como foi demonstrado no ensaio de MSCR.

Apesar da borra do óleo de soja apresentar resultados indesejáveis, onde os resultados negativos seriam devido à presença de umidade na sua composição, a secagem da mesma não apresentou resultados mais favoráveis quanto à sua trabalhabilidade e desempenho como rejuvenescedor, tornando a borra *in natura* uma solução mais viável pelo seu menor custo de aplicação sem a necessidade do protocolo de secagem e por apresentar resultados quanto à redução de temperatura de mistura e de compactação, onde com a borra de óleo soja seca não foi obtida.

### 5.1 Sugestões para pesquisas futuras

Tendo como objetivo o desenvolvimento de um estudo mais amplo sobre o desenvolvimento da aplicação de resíduos de óleos vegetais como rejuvenescedores asfálticos, fica proposto as seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- (1) Analisar quimicamente a borra do óleo de soja seca por meio do FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*);
- (2) Investigar o uso da borra de outros óleos vegetais como milho, canola, girassol como modificador do ligante asfáltico e comparar os dados obtidos com os mesmos bio-óleos após o processo de secagem.

## 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 D6373: 2021**: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. Estados Unidos, 2021.
- ARAÚJO, A. M. **Borra de óleo de soja: caracterização físico-química e avaliação da potencialidade econômica**. (Trabalhado de Conclusão de Curso). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- BERNUCCI, L. B. *et al.* **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: Formação básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS. 2008.
- BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**. São Paulo, ed. Fazendo Arte, 2017.
- COSTA, E. L. C. **Análise física empírica e reológica de ligante asfáltico modificado com borra do óleo de soja**. (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Estadual da Paraíba, Araruna, 2022.
- CUNHA, C. M. **Reciclagem de pavimentos rodoviários flexíveis. Diferentes tipos de reciclagem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2010.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – 1966**: Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis. São Martinho: DNER, 2014.

DANTAS, I. S. **Efeito da adição do óleo de algodão refinado nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo.** (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

Embrapa Soja. **EMBRAPA**, Londrina-PR, 2017. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1>>. Acesso em: 24 de Outubro de 2022.

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.

GASPAR, M. S. **Mecanismo de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

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.

MOTHÉ, M. G. **Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ODA, S; NASCIMENTO, L; EDEL, G. **Aplicação de asfalto-borracha na Bahia.** (Trabalho Técnico Científico). Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Salvador, 2005.

OLIVEIRA NETO, H. R. **Avaliação física empírica e reológica de ligante asfáltico modificado com o ácido graxo da borra do óleo de soja para uso em misturas asfálticas recicladas.** (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Estadual da Paraíba, Araruna, 2022.

PICADO-SANTOS, L.; PEREIRA, P. **Technical-economical evaluation of pavement recycling alternatives. Third gulf conference on roads.** Universidade de Minho, Guimarães, Portugal, 2016.

RIGO, A. A; DAHMER, A. M; STEFFENS, C; STEFFENS, J; CARRÃO PANIZZI, M. C; LEITE, R. S; MANDARIONO, J. M. G; CEZARO, A. M. **Obtenção e caracterização de farinhas de soja de variedades geneticamente melhoradas para alimentação humana.** (Produção Acadêmica). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

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.

SANTOS, F; FAXINA, A. **Estudo da incorporação de bio-óleos à base de soja como agentes rejuvenescedores de ligantes asfálticos.** (Produção acadêmica). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Balneário Camboriú, 2019.

SILVA, E. S. **Utilização de resíduo de fresagem de pavimentos asfálticos em bases estabilizadas granulometricamente e em revestimentos asfálticos na cidade de Manaus.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013.

SILVA, H. M. R. D; OLIVEIRA, J. R. M; JESUS, C. **Are totally recycled hot mix Asphalts a sustainable alternative for road paving?** V. 60, p. 38-48, 2012.

Silva, L. S. **Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos. Influência da adição de polímeros e comportamento frente a radiação UV.** Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SWERN, D. Refining and Bleaching. *In*: SWERN, D. **Bailey's Industrial Oil and Fat Products.** 4. thed. New York: J. Wiley and Sons, 1982, v.2, cap. 4 p. 253 – 413.

ZAFANELI, F. A. F. **Avaliação de pré-viabilidade técnica e econômica de produção de biodiesel 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.

ZAUMANIS, M; MALLICK R. B; FRANK, R. **Determining Optimum Rejuvenator Dose for Asphalt Recycling Based On Superpave Performance Grade Specifications, Construction and Building Materials,** 2014, v.69, p. 159-166.

WHITEOAK, D. **SHELL Bitumen Handbook.** SHELL, Inglaterra, 1990.