



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA – UEPB

CAMPUS VIII – ARARUNA

CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE – CCTS

COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL

HUGO RIBEIRO DE OLIVEIRA NETO

**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**

Araruna – PB

2022

HUGO RIBEIRO DE OLIVEIRA NETO

**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 apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como um requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

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

Coorientadora: Profa. Ingridy Minervina Silva.

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.

O48a Oliveira Neto, Hugo Ribeiro de.

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 [manuscrito] / Hugo Ribeiro de Oliveira Neto. - 2022.

54 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."

"Cooorientação: Profa. Esp. Ingridy Minervina Silva ,UFCG - Universidade Federal de Campina Grande"

1. Pavimentação. 2. Agente Rejuvenescedor. 3. Resíduos.
I. Título

21. ed. CDD 625.7

HUGO RIBEIRO DE OLIVEIRA NETO

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 apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil
da Universidade Estadual da Paraíba, como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Aprovado em: 28 / 07 / 2022.

BANCA EXAMINADORA

Osires de Medeiros Melo Neto

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

Ingridy Minervina Silva

Prof. Ingridy Minervina Silva (Coorientadora)
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Albaniza Maria da Silva Lopes

Prof. Ma. Albaniza Maria da Silva Lopes
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Yáscara Maia Araújo de Brito

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

**Dedico este trabalho ao meu pai,
José Valdo Gomes (*in memoriam*), que
sempre me apoiou e nunca perdeu a fé nos
meus sonhos.**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por sempre me dar força, saúde e perseverança para superar todas as dificuldades ao longo da vida.

Aos meus pais, Ana Daise e José Valdo (*in memorian*), pelo amor incondicional, por sempre estarem presentes e sempre me apoiarem em todos meus sonhos. Sem vocês nada disso seria possível.

A minha tia Maria da Conceição e minha avó Maria da Penha, por sempre fazerem tudo possível pela minha educação, sempre acreditando nos meus sonhos e me permitindo chegar até aqui.

A Hélio, Fábria, Dona Carminha e Seu José Diniz (*in memorian*), por terem me acolhido tão bem em Araruna, se tornando uma família para mim.

Ao meu orientador, Prof. Me. Osires de Medeiros Melo Neto, por ter aceitado me orientar e por sempre se dispor a me ajudar no desenvolvimento deste trabalho.

A Thaynah Simões, por sua amizade, companheirismo, conselhos, puxões de orelha e por nunca deixar de acreditar no meu potencial.

A Luciana Albuquerque, por sempre estar ao meu lado e sempre me incentivar a procurar ser alguém melhor a cada dia. Amo você.

Aos amigos que fiz ao longo da vida: Bruno Jordão, Bruno Taveira, Fábio Aragão, Glauber Almeida (*In memorian*), Caio Galvani, Itallo Victor, Gabriel Pierre, Bianca Agra, Jéssica Ariela, Jelson Moura, Vinícios Farias, Inácio Lira e todos os que colaboraram para a minha trajetória de alguma maneira.

Aos meus amigos de curso: Ennya Monteiro, Mathews Vaz, Jeferson Araújo, Douglas Nóbrega, Letícia Oliveira, Ben Hur Nóbrega, Eugênio Pacelli, João Marcos Minervino, Gabriel Paz e Rodolfo Luís. Esta caminhada foi muito mais divertida com vocês ao meu lado.

Aos amigos que fiz ao longo da minha vida acadêmica: Pablo Ícaro, Rafael Araújo, Werley Targino, Carlos Vinícius, Elói Ribeiro, Pedro Victor e Pedro Cesar. Por compartilharem comigo o lado bom da vida.

A todos os sobreviventes da casa de Zé das celas: Aramys Matheus, Marcos Vitor, Lucas Lustosa, Ari Dantas, Wesley Brasil, Vini Neto, Pedro Terra, Alexandre Liberato e Cristiano Marinho.

Aos amigos conquistados durante minha estadia em Araruna: Yonara Clementino, Genézio Albuquerque, Bruna Guedes, Rayssa Mousinho, Lucas V., Matheus Neves, Lucas Macedo, Tércio Diniz, Igor Silveira, Juan Dantas e Gabriela Nobre.

Aos professores da graduação que se tornaram amigos: Alan Cavalcanti e Daniel Baracuy por todo conhecimento e apoio dado.

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

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG, por fornecer os meios para a realização da minha pesquisa.

À IMCOPA pela doação da borra do óleo de soja para a realização desse estudo.

“Aqui, no entanto nós não olhamos para trás por muito tempo. Nós continuamos seguindo em frente, abrindo novas portas e fazendo coisas novas, porque somos curiosos... E a curiosidade continua nos conduzindo por novos caminhos. Siga em frente!”

Walt Disney

RESUMO

Devido ao constante crescimento do tráfego, associado ao peso dos veículos, o número de casos de deterioração precoce dos revestimentos asfálticos tem aumentado frequentemente, gerando defeitos na camada de revestimento asfáltico, como deformações permanentes, gerando a necessidade da aplicação de procedimentos de manutenção e reparos da camada de revestimento, gerando ainda mais resíduos. O processo de manutenção gera um resíduo de grande valor na composição de novas mistura, o RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*). Quando retirado o RAP possui uma elevada rigidez, deixando-o mais vulnerável a trincas prematuras. Com o objetivo de recuperar as propriedades reológicas do ligante e melhorar o processo de reciclagem, é necessária a adição de um agente rejuvenescedor. Esta pesquisa avaliou as características físicas empíricas e reológicas da adição do ácido graxo da borra do óleo de soja (AGS) no ligante asfáltico como redutor de viscosidade nos teores de 6% e 7% para uso em misturas asfálticas recicladas. A metodologia utilizada compreendeu a caracterização do ligante por meio da realização dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, *performance grade*; antes e após o ensaio de envelhecimento a curto prazo e *multiple stress and recovery*. Os resultados mostraram que houve uma perda de massa fora dos critérios estabelecidos em norma, decorrente da perda de material volátil. No ensaio de penetração houve um aumento na penetração, indicando uma menor rigidez com o aumento da adição do modificador. O ácido graxo da borra do óleo de soja conseguiu reduzir em dois degraus a temperatura de PG em todos os teores testados. Dessa forma, a adição do ácido graxo da borra do óleo de soja como agente rejuvenescedor ao ligante asfáltico se caracteriza como uma alternativa viável e sustentável, com potencial rejuvenescedor para a misturas asfálticas recicladas.

Palavras-chave: Pavimentação. Agente rejuvenescedor. Resíduos.

ABSTRACT

Due to the constant growth of traffic, associated with the weight of vehicles, the number of cases of early deterioration of asphalt coatings has frequently increased, generating defects in the asphalt coating layer, such as permanent deformations, generating the need to apply maintenance and repair procedures. of the coating layer, generating even more waste. The maintenance process generates a residue of great value in the composition of new mixtures, the RAP (Reclaimed Asphalt Pavement). The RAP has high rigidity when removed, leaving it more vulnerable to premature cracking. In order to recover the rheological properties of the binder and improve the recycling process, it is necessary to add a rejuvenating agent. This research evaluated the empirical and rheological physical characteristics of adding fatty acid from soybean oil sludge (AGS) to the asphalt binder as a viscosity reducer at 6% and 7% for use in recycled asphalt mixtures. The methodology used included the characterization of the binder by performing penetration tests, softening point, rotational viscosity, performance grade; before and after the short-term aging, and multiple stress and recovery assay. The results showed a loss of mass outside the criteria established in the standard, due to the loss of volatile material. In the penetration test, there was an increase in penetration, indicating a lower stiffness with increasing addition of the modifier. The fatty acid from soybean oil sludge was able to reduce the PG temperature by two steps at all levels tested. Thus, the addition of fatty acid from soybean oil sludge as a rejuvenating agent to the asphalt binder is characterized as a viable and sustainable alternative, with rejuvenating potential for recycled asphalt mixtures.

Keywords: Pavement. Rejuvenating agent. Residue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma geral do programa experimental	26
Figura 2 - Borra do óleo de soja	27
Figura 3 - Fluxograma de etapas da acidulação da borra do óleo de soja	30
Figura 4 - Ácido graxo da borra do óleo de soja	31
Figura 5 - (a) Equipamento utilizado para realização do ensaio de penetração, (b) Pote de penetração com as amostras ensaiadas	32
Figura 6 - Conjunto anel e bola	33
Figura 7 - (a) Viscosímetro rotacional Brookfield, (b) Amostras de ligante ensaiadas .	34
Figura 8 - Estufa de filme fino rotativo utilizada para realizar o envelhecimento a curto	35
Figura 9 - Temperatura de compactação e mistura.....	42
Figura 10 - Grau de desempenho dos ligantes asfálticos puro e modificados: PG	43
Figura 11 - Grau de desempenho dos ligantes asfálticos puro e modificado: PG contínuo	44
Figura 12 - Parâmetro Módulo Complexo (G^*) em função da temperatura antes e após RTFO.....	45
Figura 13 - Índice de envelhecimento das amostras de ligante asfáltico.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado da caracterização da borra do óleo de soja.....	28
Tabela 2 - Variação em massa após ensaio de envelhecimento a curto prazo	38
Tabela 3 - Ensaio de Penetração.....	39
Tabela 4 - Ensaio de ponto de amolecimento – Método do anel e bola	40
Tabela 5 - Viscosidade rotacional antes do RTFO	41
Tabela 6 - Viscosidade rotacional após o RTFO	41
Tabela 7 - Temperaturas de compactação e de mistura.....	42
Tabela 8 - Parâmetros obtidos no teste de fluência e recuperação sob tensão múltipla .	47

LISTA DE QUADROS

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

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AB	<i>Asphalt Binder</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGS	<i>Soy Oil Sludge Fatty Acid</i>
AI	Índice de Envelhecimento
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AOCS	<i>American Oil Chemists' Society</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Conselho Nacional de Trânsito
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
NBR	Norma Brasileira
PG	<i>Performance Grade</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PPR	Porcentagem de Penetração Retida
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RTFO	<i>Rolling Thin-Film Oven</i>
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	Ligantes asfálticos	18
3.1.1	<i>Ligantes asfálticos modificados</i>	19
3.2	Uso de óleos em ligantes asfálticos	21
3.3	Óleo de soja	22
3.3.1	<i>Borra do óleo de soja</i>	23
3.3.2	<i>Ácido graxo da borra do óleo de soja</i>	23
3.4	Misturas asfálticas recicladas	24
3.5	Considerações finais	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1	Materiais	27
4.1.1	<i>Borra do óleo de soja</i>	27
4.1.2	<i>Ligante asfáltico</i>	28
4.2	Métodos	29
4.2.1	<i>Acidulação da borra do óleo de soja</i>	29
4.2.2	<i>Modificação do ligante asfáltico</i>	30
4.2.3	<i>Ensaio físico empírico</i>	32
4.2.4	<i>Ensaio reológico</i>	35
5	RESULTADOS	38
5.1	Envelhecimento a curto prazo (RTFO)	38
5.2	Ensaio de penetração	39
5.3	Ponto de amolecimento	40
5.4	Viscosidade rotacional	40
5.5	Grau de desempenho (PG)	43
5.6	Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR)	46
6	CONCLUSÃO	49
6.1	Considerações finais	49
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	50
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o modal rodoviário é o modo de transporte de maior utilização no transporte de cargas e passageiros, sendo responsável por mais de 50% do PIB (Produto Interno Bruto) do setor de transportes do país. Por causa de sua grande influência, o sistema rodoviário é de grande importância direta ou indireta para o desenvolvimento socioeconômico do país (CNT, 2019).

Segundo o anuário do CNT (Conselho Nacional de Trânsito), o Brasil possui cerca de 1,7 milhões de quilômetros em rodovias, onde apenas 12,4% são de rodovias pavimentadas. Apesar da importância, o modal rodoviário apresenta vários problemas, tais como: baixa produtividade, elevados níveis de emissão de poluentes e baixa segurança (DE VOS; WITLOX, 2013; DURANTON; PUGA, 2013; VAN HAPEREN et. al., 2019; TOMASIELLO et. al., 2020).

O tipo de pavimento mais utilizado nas rodovias brasileiras é o pavimento flexível, por causa da facilidade construtiva em relação aos demais tipos de pavimentos. Os pavimentos flexíveis no Brasil são projetados para durar entre 8 e 12 anos, porém, as rodovias sob gestão pública vêm a apresentar problemas na sua estrutura precocemente, algumas vezes, os problemas começam a surgir em menos de um ano após a entrega da obra (CNT, 2017).

A construção de estradas constitui a maior fração dos investimentos direcionados para a infraestrutura, consumindo cerca de 30% dos recursos naturais, além de gerar por volta de 25% de todos os resíduos sólidos da indústria da construção no mundo (BENACHIO *et al.*, 2020).

Devido ao constante crescimento do tráfego, associado ao peso dos veículos, o número de casos de deterioração precoce dos revestimentos asfálticos tem aumentado frequentemente, gerando defeitos na camada de revestimento asfáltico, como deformações permanentes (LEAL, 2013). Além disso, fatores como o mau dimensionamento, execução inadequada, dosagens erradas de materiais, mau uso das vias e até mesmo o envelhecimento natural do revestimento, geram a necessidade da aplicação de procedimentos de manutenção e reparos da camada de revestimento, gerando ainda mais resíduos (FONSECA et. al., 2014). Sendo assim, fica cada vez mais indispensável

o desenvolvimento de novas tecnologias para a reutilização dos resíduos (LUCENA, 2005; BRINGEL, 2007; LIMA, 2008a; SOBREIRO, 2014; NASCIMENTO, 2015).

No processo de manutenção do revestimento asfáltico, o processo de fresagem é o responsável pela grande geração de resíduos. A fresagem é o processo de corte da camada asfáltica, e é feito pelo emprego de movimentos circulares de corte, feitos por uma fresadora (DIB, 2013). O processo de corte por fresagem da camada asfáltica gera um resíduo de alto valor e com propriedades físicas e mecânicas de grande valor na composição de novas misturas, o RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) (CUNHA *et al.*, 2018).

Quando retirado, o RAP possui uma elevada rigidez, fazendo com que resista a deformações permanentes a altas temperaturas. Porém, se torna mais vulnerável a trincas prematuras por fadiga (SEIDEL; HADDOCK, 2014). Com o objetivo de recuperar as propriedades reológicas do ligante e melhorar o processo de reciclagem, é necessária a adição de um agente rejuvenescedor. O desempenho da mistura asfáltica reciclada irá depender diretamente do tipo e da dosagem do agente rejuvenescedor escolhido (CASEY *et al.*, 2008; ZAUMANIS *et al.*, 2014; DOKANDARI *et al.*, 2017).

A adição de óleos como agentes rejuvenescedores vem ganhando bastante destaque nos últimos anos, isso por causa de suas propriedades químicas e de sua viabilidade ambiental (DEVULAPALLI; KOTHANDARAMAN; SARANG, 2019; LI *et al.*, 2019; TAHERKHANI; NOORIAN, 2019; ZIARI *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2020a; XINGYU; RUIKUN; NAIPENG, 2020). O óleo de soja é o segundo óleo mais produzido em nível mundial, sendo produzido cerca de 60 milhões de toneladas entre 2020 e 2021 (SHAHBANDEH, 2021).

A borra do óleo de soja é o principal subproduto da indústria de refino desse grão, ela é produzida por meio da neutralização do refino químico do óleo bruto, onde os ácidos graxos livres são neutralizados pela adição de álcalis, resultando em sabões. Essa borra, devido ao seu alto conteúdo de ácidos graxos, pequeno valor econômico e grande disponibilidade é uma alternativa de matéria-prima sustentável para a diminuição da viscosidade de ligantes asfálticos. Após o processo de acidulação, essa borra se torna um concentrado de ácidos graxos apresentando efeito amolecedor em ligantes asfálticos (SEIDEL; HADDOCK, 2014).

Melo Neto (2022) investigou o uso do ácido graxo da borra do óleo de soja como redutor de viscosidade no ligante asfáltico classificado com penetração 50/70, nos teores de 1%, 3% e 5% em peso de ligante. Os resultados apontaram que à medida que se aumentou o teor do ácido graxo a viscosidade e rigidez do ligante foi reduzida, obtendo valores de temperatura máxima de *performace grade* (PG) de 52°C. À medida que se diminui o PG, maior o teor de RAP a ser adicionado na produção de misturas asfálticas recicladas.

Dessa forma, a lacuna observada foi a ausência de estudos com maiores teores de ácido graxo no ligante asfáltico a fim de reduzir ainda mais a viscosidade e PG do ligante asfáltico para viabilizar maiores teores de RAP a serem adicionados em misturas asfálticas recicladas. Portanto, esta pesquisa investigou o uso de teores de 6% e 7% de ácido graxo da borra do óleo de soja como modificador redutor de viscosidade e rigidez de ligante asfáltico.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa buscou avaliar as características físicas empíricas e reológicas da adição do ácido graxo da borra do óleo de soja no ligante asfáltico classificado com grau de penetração 50/70 como redutor de viscosidade nos teores de 6% e 7% para uso em misturas asfálticas recicladas.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar as propriedades do ligante asfáltico modificado com os teores de ácido graxo da borra do óleo de soja antes e depois de submetido ao procedimento de envelhecimento a curto prazo por meio de ensaios físicos empíricos;
- 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 ácido graxo da borra do óleo de soja utilizando o reômetro de cisalhamento dinâmico.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

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

3.1 Ligantes asfálticos

O ligante asfáltico é o principal material do revestimento asfáltico (YUAN *et al.*, 2021). Este material é proveniente do petróleo, e é constituído predominantemente por betume, que é definido como uma mistura de hidrocarbonetos (LUCENA, 2005). Na mistura asfáltica, o ligante possui função de impermeabilizante e aglomerante. A função impermeabilizante impede a entrada de água na estrutura do pavimento, o que causaria o comprometimento da estrutura, enquanto a função aglomerante garante a ligação e envolvimento com os agregados, evitando a desagregação causada pelo constante tráfego (SOBREIRO, 2014).

O pavimento é uma estrutura composta pelo revestimento, base, sub-base e o reforço do subleito. O revestimento asfáltico quando aplicado, tem como principais funções: resistir aos esforços do tráfego, resistir aos efeitos das condições climáticas, impermeabilizar o pavimento, garantir conforto e segurança aos usuários (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os asfaltos podem ser encontrados de maneira natural, em jazidas naturais decorrente da evaporação das frações mais voláteis de jazidas de petróleo localizadas na superfície terrestre, e através da destilação ou refino do petróleo em unidades industriais, onde após a destilação é obtido um material com consistência adequada à pavimentação, o CAP (Cimento asfáltico de petróleo) (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é uma combinação de hidrocarbonetos de alta massa molar, cujos itens fundamentais são o carbono e o hidrogênio, compreendendo também outros elementos, como por exemplo, o oxigênio, enxofre e certos metais (LEITE, 1999).

O desempenho do pavimento está ligado diretamente às características dos seus constituintes. O seu desempenho é considerado satisfatório quando proporciona conforto e segurança ao rolamento dos veículos, durabilidade, resistência às cargas, deformações, fraturas e desagregações, sem se tornar instável ao tráfego e às condições climáticas. As misturas asfálticas estão sujeitas à deformação elástica, viscoelástica, plástica e viscoplástica sob carregamento (PERL; UZAN; SIDES, 1983).

As propriedades dos ligantes asfálticos sofrem com a ação do tempo, desde sua fabricação até o final da sua vida útil. Essa evolução fica evidenciada pela perda de suas propriedades mecânicas, e é conhecida como envelhecimento. Esse é o principal causador de problemas nas misturas asfálticas, afetando diretamente na vida útil dos pavimentos asfálticos (MIRÓ *et al.*, 2015).

A redução da vida útil dos pavimentos tem influência direta no aumento na busca por ligantes de melhor qualidade. A adição de modificadores, na busca do melhoramento da qualidade do CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) e no desempenho das misturas asfálticas vem se tornando uma prática comum. A modificação dos ligantes asfálticos tem como objetivo a melhora do comportamento mecânico dele, e conseqüentemente ganho no desempenho funcional dos pavimentos. A incorporação do aditivo busca ainda superar algumas desvantagens do ligante puro, podendo melhorar a sua capacidade de resistência ao acúmulo de deformações permanentes, resistência ao aparecimento de trincas por fadiga e contração térmica, podendo também retardar o envelhecimento prematuro do CAP e melhorar sua interação com os agregados (ROSA JÚNIOR, 2015; GAMA, 2016).

3.1.1 Ligantes asfálticos modificados

O envelhecimento do ligante asfáltico o torna mais rígido, mais quebradiço e, portanto, mais suscetível a danos por fadiga devido ao tráfego e às cargas térmicas (BAGHAEI MOGHADDAM; BAAJ, 2016). Dessa forma, o envelhecimento acarreta uma deterioração precoce dos pavimentos flexíveis construídos com ligantes convencionais, tornando necessária a busca por melhorias em suas propriedades e no seu desempenho (Zhang *et al.*, 2015).

O desempenho dos pavimentos depende diretamente das características dos seus constituintes: agregados, ligantes asfálticos e aditivos. Com o passar do tempo, os pavimentos danificados requerem reabilitação, a solução geralmente é a reconstrução total com misturas asfálticas a quente. A reciclagem é a técnica que melhor preserva os recursos naturais, pois minimiza o uso de materiais de origem petrolífera (FLORES *et al.*, 2020).

Para que sejam feitas as manutenções, reparos e reconstruções dessa camada asfáltica, há uma grande geração de resíduos, provenientes do processo de fresagem, que possuem grande valor econômico e que podem ser introduzidos na composição de novas misturas (CUNHA *et al.*, 2018). O uso do RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) tem diminuído significativamente a geração de resíduos, promovendo uma boa movimentação na economia, propiciando benefícios econômicos e ambientais (SANCHEZ-ALONSO, 2011; YANG *et al.*, 2015; VANDEWALLE *et al.*, 2020).

O ligante asfáltico que é extraído do RAP possui uma elevada rigidez, que o permite resistir à deformação a altas temperaturas, porém o torna mais frágil a trincamentos prematuros por fadiga. Portanto, há a necessidade da adição de agentes de reciclagem, para tornar esses ligantes mais macios e os tornar viáveis e resistentes à fadiga e trincamento prematuro (SEIDEL; HADDOCK, 2014).

Os agentes rejuvenescedores atuam como modificadores de viscosidade, melhorando as propriedades de rigidez de baixa temperatura do ligante asfáltico recuperado. Contudo, podem ter efeito negativo na resistência à deformação permanente a altas temperaturas, sendo importante avaliar o tipo e o teor dos rejuvenescedores para equilibrar as propriedades características do RAP (ARÁMBULA-MERCADO *et al.*, 2018).

Seidel e Haddock (2014) promoveram estudos reológicos da modificação dos ligantes asfálticos com o ácido graxo da borra do óleo de soja, e constataram a alteração da sensibilidade da consistência dos ligantes à variação da temperatura. Assim, agindo como um redutor de rigidez e viscosidade.

3.2 Uso de óleos em ligantes asfálticos

A adição de porções acima de 30% de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) pode resultar em uma mistura mais rígida, que pode causar posteriormente fraturas prematuras do revestimento (MOGAWER *et al.*, 2012). Assim, para que seja viável a utilização de RAP em novas misturas asfálticas é necessária a adição de um produto químico (agente rejuvenescedor), que irá neutralizar o constituinte alterado do ligante envelhecido (LINS *et al.*, 2008).

Os agentes rejuvenescedores são comumente recomendados para melhorar a composição química e reológica do ligante oxidado, proveniente do RAP, tentando restaurar suas propriedades iniciais (PRADYUMMA; JAIN, 2016).

Com o crescimento dos estudos voltados à incorporação de óleos como agentes rejuvenescedores, os óleos residuais vêm ganhando grande destaque devido às suas propriedades químicas, que são parecidas com as de óleos virgens e por possuírem uma boa viabilidade ambiental, como uma destinação adequada para os resíduos. Existem diferentes tipos de óleos residuais, entre eles se destacam os óleos de motor e os de cozinha (DEVULAPALLI; KOTHANDARAMAN; SARANG, 2019; LI *et al.*, 2019; TAHERKHANI; NOORIAN, 2019; ZHANG *et al.*, 2019; ZIARI *et al.*, 2019; XINGYU; RUIKUN; NAIPENG, 2020).

Os bio-óleos são geralmente aplicados na indústria de ligantes asfálticos como modificadores (teor abaixo de 10% em substituição ao ligante asfáltico), extensores (teor de 25% a 75% de substituição ao ligante asfáltico) e substituintes (teor de 100% de bio-óleos ao invés do ligante asfáltico) (HE *et al.*, 2017). Os aditivos químicos facilitam o umedecimento dos agregados, controlando o atrito interno da mistura e melhorando a interação dos constituintes da mistura asfáltica (FERROTTI *et al.*, 2017).

Pradhan e Sahoo (2020) realizaram estudos utilizando misturas asfálticas recicladas modificadas com óleo da *Calophyllum inophyllum* a 5%. Os resultados apontaram que o ligante rejuvenescido é estável até 230 °C, ou seja, permanece estável durante os processos de produção e compactação da mistura asfáltica. Os resultados também mostraram que na mistura pode ser incorporado teores de até 60% de RAP com sucesso, apresentando resultados de ensaios mecânicos parecidos com o das misturas asfálticas convencionais.

Os óleos vegetais são ecologicamente corretos, pois são derivados da natureza e têm componentes estáveis (SINGH; RANSINCHUNG, 2018; LIU *et al.*, 2021a; LIU *et al.*, 2021b).

Seidel e Haddock (2014) realizaram estudos utilizando ligantes asfálticos modificados com o ácido graxo da borra do óleo de soja, fonte de ácidos graxos da soja altamente concentrada e de baixo custo. Os resultados apontaram que à medida que maiores teores de ácido graxo são incorporados, os ligantes se tornam menos rígidos e a viscosidade em altas temperaturas é reduzida.

3.3 Óleo de soja

A soja é um grão rico em proteínas, que é consumido tanto pelo ser humano, quanto por animais. É um grão amarelado, com formato arredondado e que possui até 20% de óleo e teor de proteína de 45% (EMBRAPA, 2016). Essa leguminosa contém o segundo maior teor de óleo dentre todos os cereais e sementes leguminosas (REZENDE, 2012).

Os óleos são substâncias hidrofóbicas, de origem animal, vegetal ou microbiana. Esses óleos apresentam substâncias que são reunidas em duas categorias: os glicerídeos e os não-glicerídeos. Na atualidade o óleo retirado da semente da soja domina o mercado mundial de proteína vegetal e de óleos comestíveis. O óleo de soja possui características singulares, fazendo com que seja indicado para um vasto número de aplicações (MORETTO; FETT, 1998).

Diante do alto consumo de óleos vegetais, em especial do óleo de soja, é importante que se busquem meios para o reaproveitamento deste material, para que seja evitado o descarte inapropriado e consequentemente danos mais severos a natureza. Ultimamente vêm surgindo alternativas ecologicamente corretas, entre elas, o uso desse óleo no desenvolvimento de ligantes asfálticos alternativos a partir da biomassa para a construção de pavimentos flexíveis (GAO *et al.*, 2018, WANG *et al.*, 2018).

3.3.1 Borra do óleo de soja

A industrialização de sementes leguminosas se divide em duas partes: A produção de óleos brutos e o refino do óleo bruto produzido. O refino do óleo bruto pode ser definido como um conjunto de procedimentos para transformar óleos brutos em óleos comestíveis (DA FRÉ, 2009). O objetivo do refino é melhorar o visual, odor e sabor do óleo bruto por meio da remoção de componentes, como os ácidos graxos livres e seus sais e ácidos graxos oxidados (MANDARINO; HIRAKURI; ROESSING, 2015).

A borra é o principal subproduto da indústria de refino de óleos vegetais. É um subproduto constituído de água, sais de sódio de ácidos graxos, triglicerídeos, fosfolípidios, matéria insaponificável e produtos de degradação (MAG *et al.*, 1983; WOERFEL, 1995).

A borra do óleo de soja é uma emulsão oleosa alcalina formada durante a etapa de neutralização dos ácidos graxos livres com hidróxido de sódio. O volume de borra gerado corresponde a apenas 6% do volume total do óleo bruto (PARK *et al.*, 2008).

De acordo com a classificação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Norma Brasileira (NBR) 10004 (ABNT, 2004), a borra do óleo de soja possui classificação I, que significa que esse resíduo representa um risco à saúde pública, causando um aumento significativo no número de mortes e/ou de doenças e apresenta efeitos adversos ao ambiente, quando manuseado de maneira errada.

Os ácidos graxos resultantes da acidulação da borra do óleo da soja podem ser utilizados nos mais variados procedimentos, pois são biodegradáveis, renováveis, além da grande disponibilidade e origem vegetal. Essas características tornam os ácidos graxos da borra do óleo da soja uma valiosa matéria-prima básica (ARAÚJO *et al.*, 2016).

3.3.2 Ácido graxo da borra do óleo de soja

Os ácidos graxos da soja, obtidos a partir da acidulação da borra do óleo da soja são matérias-primas fontes de ácidos graxos de custo menos elevado. Esse produto tem diversos usos, dentre eles o uso na produção de biodiesel, substituindo os óleos vegetais comestíveis (CANAKCI; SANLI, 2008; PARK *et al.*, 2008).

No Brasil, esse produto é comercializado como óleo ácido de soja, após a acidulação para liberação de ácido graxo e separação da água contida. A borra do óleo de soja bruta, contém de 35% a 50% de ácidos graxos totais, e a borra acidulada normalmente apresenta entre 85% e 95% (SWERN, 1982).

Os ácidos graxos resultantes da acidulação da borra do óleo de soja também são utilizados no tratamento de minérios, no mercado alimentício, em tintas e vernizes, fertilizantes, agroquímicos, plásticos, borrachas, resinas, surfactantes, ésteres, lubrificantes, cosméticos, biocombustíveis, entre outros. As várias vantagens de seu uso, respaldam o ácido graxo da borra do óleo de soja como uma matéria-prima muito valiosa, sendo biodegradável, renovável, além de possuir uma grande disponibilidade (ARAÚJO *et al.*, 2016).

3.4 Misturas asfálticas recicladas

Um dos maiores desafios atuais da construção de rodovias é sem dúvidas a busca por alternativas que possam diminuir o uso dos recursos naturais e a redução de custos de execução e manutenção (SANTERO *et al.*, 2011a, SANTERO *et al.*, 2011b).

A busca por uma saída viável para a reutilização dos materiais utilizados na pavimentação pode levar a uma conscientização das autoridades rodoviárias e empresas de pavimentação sobre a sustentabilidade ambiental de suas práticas e a circularidade de seus negócios (MANTALOVAS; DI MINO, 2020).

No geral o ideal é que a reciclagem dos resíduos sólidos oriundos da pavimentação seja uma reciclagem local, ou até mesmo em áreas próximas. Tendo em vista, que a reutilização desse material em localidades distantes pode acarretar o consumo excessivo de combustíveis, maiores custos e emissão de gases residuais (LI *et al.*, 2019).

Rodríguez-Fernández *et al.* (2020) apresentaram estudos que mostram que o comportamento mecânico das misturas asfálticas recicladas é semelhante ao de misturas convencionais, possibilitando uma redução de 12% a 15% no impacto ambiental e econômico causado. Porém mais pesquisas são necessárias para um melhor entendimento desses impactos e para que decisões mais embasadas possam ser tomadas pelos órgãos responsáveis (SALEHI *et al.*, 2021).

3.5 Considerações finais

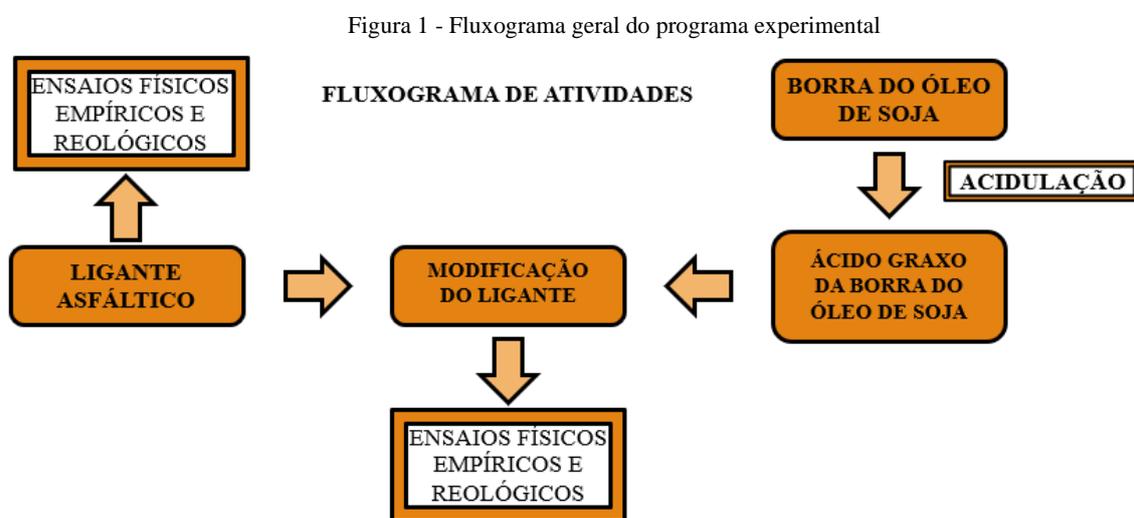
Ao longo do trabalho de Melo Neto (2022), notamos que para a utilização de teores superiores a 30% de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), é necessária a incorporação de um ligante asfáltico mais macio, ou de um agente rejuvenescedor para compensar a alta rigidez do RAP.

A literatura vem se dedicando a estudar misturas asfálticas recicladas com diferentes agentes rejuvenescedores, como óleos, ácidos e outros compostos rejuvenescedores. Porém ainda é necessário o estudo de novos agentes, que atuem como redutores de viscosidade e que sejam viáveis economicamente e ambientalmente.

Esse estudo buscou contribuir com a análise física, empírica e reológica de um ligante asfáltico convencional modificado por ácido graxo da borra do óleo de soja, material orgânico e oriundo do processo de refinamento do óleo de soja, de baixo custo e potencial para reciclagem, para ser utilizado como agente rejuvenescedor em misturas asfálticas recicladas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão apresentados os materiais utilizados nesse estudo para a produção das amostras de ligantes asfálticos modificados com o ácido graxo da borra do óleo de soja, assim como os procedimentos de avaliação e caracterização utilizados para analisar o desempenho físico e reológico do ligante asfáltico modificado com o ácido graxo da borra do óleo de soja. A Figura 1 mostra o fluxograma geral que foi utilizado no programa experimental.



Fonte: Autor

O processo de acidulação da borra do óleo de soja foi realizado no Laboratório de Saneamento da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Todos os ensaios foram realizados no LEP (Laboratório de Engenharia de Pavimentos), localizado também na UFCG.

4.1 Materiais

4.1.1 Borra do óleo de soja

O material utilizado como modificador nesse estudo foi um material derivado do processamento do óleo de soja, a borra do óleo de soja. Material esse que foi obtido pela empresa IMCOPA, localizada no Paraná. A Figura 2 apresenta a borra do óleo de soja utilizada nesse estudo.

Figura 2 - Borra do óleo de soja



Fonte: Autor

A IMCOPA disponibilizou o material sem os dados de caracterização, sendo então necessária a realização de procedimentos e ensaios laboratoriais para a caracterização dele. O material utilizado foi o mesmo utilizado por Melo Neto (2022) em sua pesquisa, onde o mesmo caracterizou o material, de acordo as normas da AOCS (*American Oil Chemists' Society*). Os resultados encontrados por Melo Neto (2022) na caracterização da borra do óleo de soja estão apresentados na Tabela 1.

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

Ensaio	Resultados	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 teor de umidade encontrado foi alto, podendo assim influenciar o resultado do ligante asfáltico, caso seja adicionada in natura, tendo em vista que o teor é superior a 40% da amostra. O teor de ácidos graxos totais na borra bruta, segundo Swern (1982), deve estar entre 35% e 50%, o resultado obtido no estudo respeita essa margem (41,59%). O grau de alcalinidade, determinado pelo teste do pH, apontou um resultado básico ou alcalino (>7,0).

Os valores obtidos durante os experimentos de caracterização buscaram quantificar e avaliar a qualidade do material utilizado, que é função direta do teor de ácidos graxos livres presentes no óleo bruto de soja (ARAÚJO, 2016; MELO NETO, 2022).

4.1.2 *Ligante asfáltico*

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi cedido pela empresa Cordilheira, localizada no município de Campina Grande-PB. O material foi classificado com penetração 50/70 (AB), temperatura máxima de PG de 64°C e foi escolhido por ter uma vasta utilização na região nordeste do Brasil.

4.2 Métodos

4.2.1 Acidulação da borra do óleo de soja

O processo de acidulação foi realizado no Laboratório de saneamento, localizado na Universidade federal de Campina Grande (UFCG). O processo foi baseado no estudo de Araújo *et al.* (2016) e feito de maneira análoga ao estudo de Melo Neto (2022).

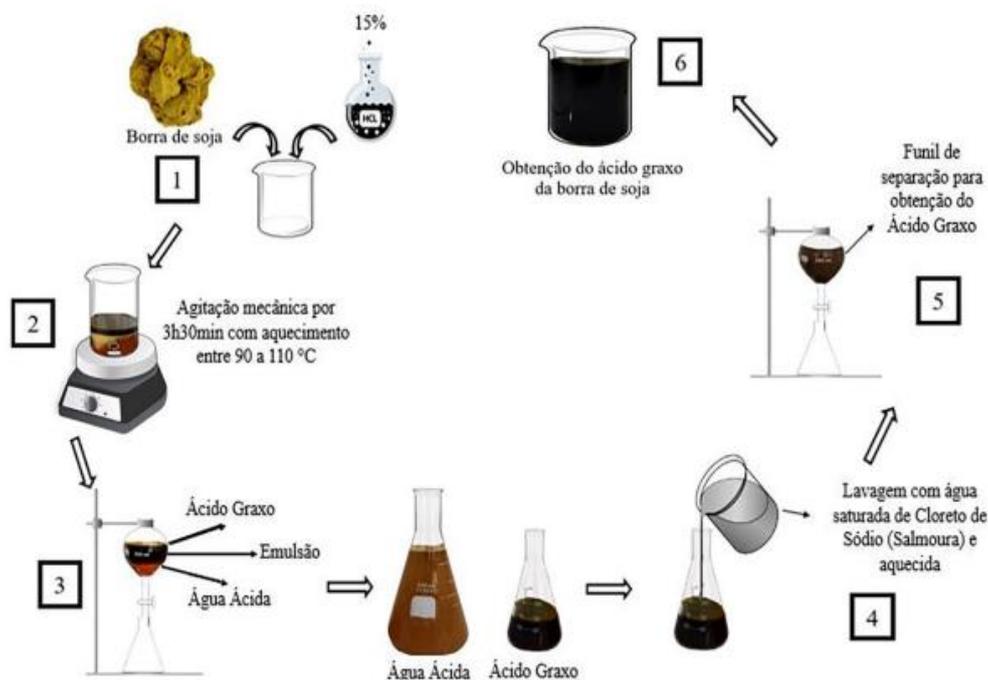
Em um Becker de 2l foi adicionado 200g de borra, juntamente com 48mL de HCl, 245mL de H₂O e 4 gotas de alaranjando de metila, indicador de pH utilizado em titulações. O processo indicado pelo autor indica o uso de ácido sulfúrico, porém, devido a falta do material no laboratório, foi utilizado o ácido clorídrico, sob condições controladas.

O procedimento foi mantido durante 3h30min, com aquecimento mantido entre 90 e 110°C em um agitador magnético com aquecimento Fisatom 752A para que os sabões fossem convertidos em ácidos graxos, conforme a reação apresentada.



O óleo foi separado da fase aquosa por decantação, em um processo de batelada. Depois de concluído o processo de decantação, foi possível observar 3 camadas distintas: Água ácida na camada inferior, emulsão oleosa na camada intermediária e o ácido graxo na camada superior. A camada inferior, que é a água ácida é descartada e o restante do material obtido é lavado com 25 – 50% de água saturada com cloreto de sódio, aquecida e decantada novamente. Após novo descarte da fase aquosa, foi obtido o ácido graxo da borra do óleo de soja. O fluxograma da acidulação da borra do óleo de soja está apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma de etapas da acidulação da borra do óleo de soja



FONTE: Melo Neto (2022).

Após o processo de obtenção do ácido graxo da borra do óleo de soja, foram realizados ensaios para a caracterização dele. O material obtido apresenta teor de umidade de 2,26% e um teor de ácidos graxos totais de 91%, valores esses que retificam o estudo de Swern (1982).

4.2.2 Modificação do ligante asfáltico

A modificação do ligante asfáltico foi realizada com o objetivo de analisar o comportamento físico e reológico do ligante modificado com diferentes teores do ácido graxo da borra do óleo de soja, sendo eles 6% e 7%.

No processo de mistura, foi utilizado um agitador mecânico Fisatom 722D. O ligante foi aquecido em uma estufa a 135°C por 90 minutos para garantir a sua fluidez. Logo após o pré-aquecimento do ligante, o material foi colocado em um Becker e colocado no agitador mecânico, submetido a rotações de 600rpm para garantir a homogeneidade da mistura. Após atingir os 140°C, foram adicionados separadamente os

aditivos e as rotações foram aumentadas até 1000rpm durante 30 minutos em teores de 6 e 7%. O método utilizado para a modificação do ligante tem como base os estudos de Melo Neto (2022) e após o processo de modificação do ligante asfáltico foi observado homogeneização das amostras sem a presença de grumos. O Quadro 1 apresenta a descrição e nomenclatura das amostras utilizadas na pesquisa.

QUADRO 1 – Nomenclatura das amostras utilizadas na pesquisa

Amostras	Nomenclatura
Ligante asfáltico com grau de penetração 50/70	AB
AB + 6% do ácido graxo da borra do óleo de soja	6% AGS
AB + 7% do ácido graxo da borra do óleo de soja	7% AGS

Fonte: Autor

A Figura 4 apresenta o ácido graxo da borra do óleo de soja utilizado nesse estudo.

Figura 4 - Ácido graxo da borra do óleo de soja



Fonte: Autor

4.2.3 Ensaios físicos empíricos

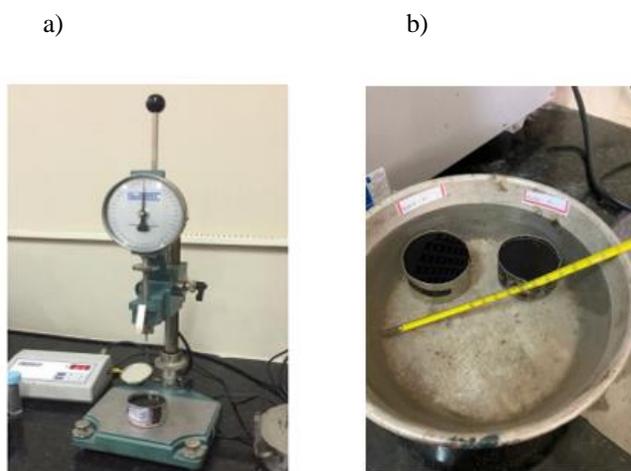
Após a obtenção dos ligantes asfálticos modificados, foi realizada a caracterização física e reológica dos ligantes, antes e após o envelhecimento *Rolling Thin Film Oven* (RTFO) ASTM D2872: 2019, por meio dos testes de Penetração ASTM D5M: 2020, Ponto de Amolecimento ASTM D36M -14: 2020, Viscosidade Rotacional ASTM D4402: 2015, *Performance Grade* (PG) ASTM D6373: 2021 e *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR) ASTM D7405: 2020.

4.2.3.1 Ensaio de penetração

O ensaio de penetração indica a profundidade em décimos de milímetros, que a agulha padronizada de 100g penetra verticalmente na amostra sob condições de cargas pré-estabelecidas, tempo de 5 segundos e temperatura de 25°C (DNIT, 2010).

O procedimento foi realizado de forma a serem obtidas cinco medições individuais de penetração, e sua média é aceita caso a diferença não exceda o limite determinado em norma. É observado que quanto menor a penetração da agulha, maior é a rigidez do ligante asfáltico. A Figura 5 mostra o equipamento utilizado para realização do ensaio e as amostras que foram ensaiadas.

Figura 5 - (a) Equipamento utilizado para realização do ensaio de penetração, (b) Pote de penetração com as amostras ensaiadas



Fonte: Autor

4.2.3.2 Ponto de amolecimento

O ensaio de ponto de amolecimento é uma medida que determina a menor temperatura necessária para que uma esfera metálica passe por um anel preenchido de material betuminoso, ambos padronizados, e percorre determinada distância sob condições pré-determinadas. É um sistema desenvolvido para medir à qual temperatura o asfalto possui determinada consistência.

Neste ensaio, duas esferas metálicas com peso e dimensões especificadas são posicionadas sobre dois anéis preenchidos com material betuminoso. O conjunto é colocado dentro de um béquer preenchido com água à temperatura ambiente. A água é aquecida a uma taxa controlada para que o ligante seja amolecido. Ao amolecer, o ligante não suporta mais o peso da esfera metálica e as esferas se deslocam ao fundo do béquer, ao atingir a placa do fundo do béquer é anotada a temperatura na qual a esfera toca a placa. Caso a diferença de temperatura entre as duas amostras exceda 2°C, tem-se a necessidade de realizar novamente o ensaio. A Figura 6 apresenta o conjunto anel e bola, utilizado para a realização do ensaio.

Figura 6 - Conjunto anel e bola



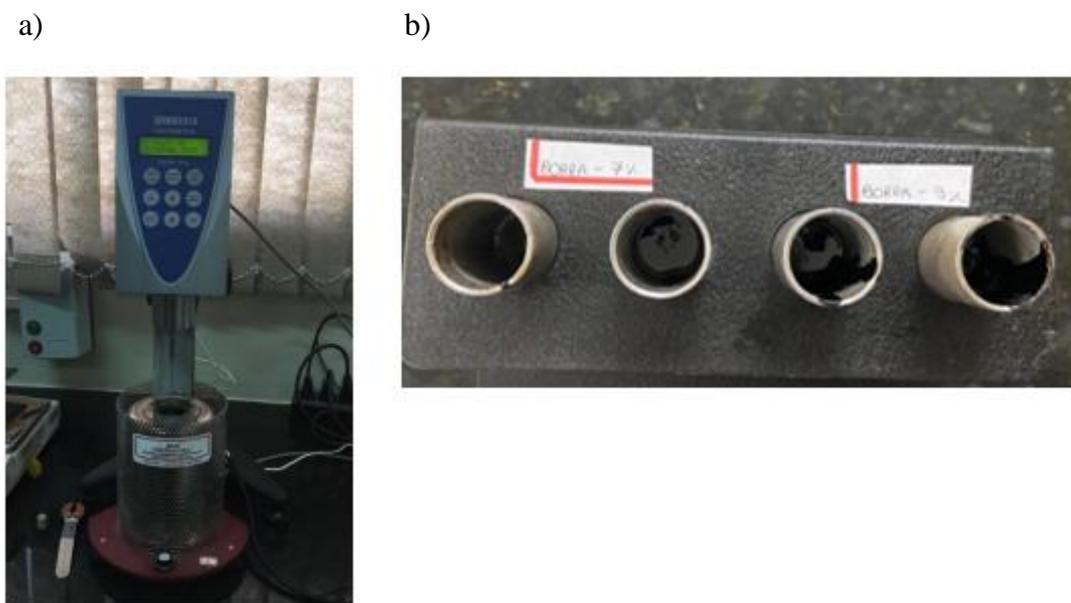
Fonte: Autor

4.2.3.3 Ensaio de viscosidade rotacional

O ensaio de viscosidade rotacional permite que determinemos a viscosidade dos ligantes e suas propriedades de consistência. Esse procedimento é utilizado em análises relacionadas ao bombeamento e estocagem dos ligantes. A partir dos dados obtidos nesse ensaio foi possível obter a curva viscosidade-temperatura.

Neste ensaio foi utilizado um controlador de temperatura e um viscosímetro rotacional, que permitiu medir o torque necessário para que a haste de prova rodasse ao ser mergulhado no ligante à temperatura, resistência à penetração e ponto de amolecimento já definidos, sob velocidade constante e uniforme. A rotação obtida determinou uma força necessária para vencer a resistência que a viscosidade do material fluido oferece ao movimento rotacional. O ensaio foi realizado nas temperaturas de 135°C, 142°C, 150°C, 165°C e 177°C. A Figura 7 apresenta o viscosímetro utilizado e as amostras ensaiadas.

Figura 7 - (a) Viscosímetro rotacional Brookfield, (b) Amostras de ligante ensaiadas



Fonte: Autor

4.2.4 Ensaios reológicos

4.2.4.1 Envelhecimento a curto prazo (RTFO)

O ensaio RTFO teve como objetivo simular o envelhecimento que a mistura asfáltica sofre durante o processo de usinagem na instalação de produção de misturas asfálticas, foi medido o efeito de calor e do ar em uma película em movimento de materiais asfálticos.

A amostra de ligante asfáltico foi colocada em um recipiente padronizado que foi inserido em um refratário vazado e submetido a giros contínuos de 163°C por 85 minutos, com uma injeção de ar a cada 3 a 4 segundos.

Depois de realizado o procedimento, fez-se a medição dos respectivos pesos para verificar a perda de massa e alterações nas propriedades físicas de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade. A Figura 8 representa o aparelho para realizar o aparelho a curto prazo.

Figura 8 - Estufa de filme fino rotativo utilizada para realizar o envelhecimento a curto



Fonte: Autor

4.2.4.2 Grau de desempenho (PG)

É de extrema importância que os ligantes usados nas misturas asfálticas ofereçam bons desempenhos nas condições em que o pavimento será exigido em serviço. Essas condições envolvem solicitações em altas e baixas temperaturas, além do volume de tráfego.

As temperaturas de PG são definidas em dois valores, um grau quente máximo e um grau frio mínimo. Nesse estudo foi determinado apenas o grau quente máximo do PG para as amostras puras e modificadas, isso, por conta das condições de clima registradas no nordeste brasileiro.

Foi feita uma varredura em função da razão entre o módulo complexo (G^*) e o seno do ângulo de fase ($\text{sen } \delta$) para se definir o PG de uma amostra de ligante asfáltico para temperaturas. O indicador é calculado a partir de uma escala de variação de 6° em 6° graus Celsius entre cada leitura. A faixa de temperaturas inicial utilizada para se alcançar o PG foi a de $46^\circ\text{C} - 64^\circ\text{C}$.

O PG corresponde à faixa de temperaturas na qual os valores de $G^*/\text{sen } \delta$ são superiores a 1,0 kPa e 3,2 kPa, respectivamente para as amostras antes e após o envelhecimento a curto prazo. A temperatura máxima será obtida com o ponto de falha determinado no ensaio (BERNUCCI et. al, 2007).

4.2.4.3 Grau de desempenho contínuo

Nesse estudo também foi realizado o ensaio do PG continuado, que analisa o ponto de falha do ensaio com uma variação de 1°C entre cada leitura, diferente do PG que analisa com variação de 6 em 6 graus.

Fazendo o ensaio do PG continuado é possível adquirir resultados mais precisos do PG, assim, obtendo-se uma melhor avaliação entre amostras antes e depois do envelhecimento a curto prazo (ZIEGLER, 2017).

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

O ensaio MSCR foi necessário para determinar o grau de elasticidade do ligante em altas temperaturas juntamente com a deformação acumulada recuperável. No ensaio foi utilizado o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) aplicando uma carga constante de 1s na amostra e deixando-a descansar por 9s. O ciclo foi realizado em dois níveis de tensão (0,1kPa e 3,2kPa), sem intervalo de tempo ao alterar o nível. A temperatura utilizada para cada amostra correspondeu à temperatura de PG do ligante base (AB) e as temperaturas de PG de cada amostra modificada.

5 RESULTADOS

Nesse tópico serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na fase experimental dos ligantes asfálticos modificados com o ácido graxo da borra do óleo de soja nos teores de 6% e 7%.

5.1 Envelhecimento a curto prazo (RTFO)

As amostras foram submetidas ao envelhecimento a curto prazo RTFO, comparou-se os pesos antes e após o procedimento para se obter a variação de massa. Os resultados estão representados na Tabela 2:

Tabela 2 - Variação em massa após ensaio de envelhecimento a curto prazo

AMOSTRA	PERDA DE MASSA (%)
AB	0,121
6%AGS	0,754
7%AGS	0,995

Fonte: Autor

Analisando as especificações da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) através da resolução N° 19/2005, pode-se dizer que as variações de massa apresentadas pelas amostras modificadas com o ácido graxo da borra do óleo de soja na Tabela 2 não estão dentro dos critérios estabelecidos (<0,5). A partir desses dados, pode-se inferir que o ligante asfáltico modificado tenha sofrido algum processo de oxidação com a perda de substâncias voláteis.

Analisando o trabalho de Melo Neto (2022), percebe-se que com dosagens menores do agente modificador a variação de massa é menor e permanece dentro dos padrões estabelecidos em norma.

5.2 Ensaio de penetração

O ensaio de penetração também foi realizado antes e após o RTFO, os resultados estão apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 - Ensaio de Penetração

AMOSTRA	PENETRAÇÃO	PENETRAÇÃO APÓS RTFO
AB	58,0	39,0
6%AGS	229,0	75,8
7%AGS	274,2	128,8

Fonte: Autor

Pode-se observar um aumento na penetração, indicando que o agente modificador proporciona uma menor rigidez ao ligante com o aumento da adição do ácido graxo da borra do óleo de soja, porém, nota-se uma diminuição nos valores após o envelhecimento em curto prazo em RTFO, o que ocorre devido a ocorrência de envelhecimento do ligante asfáltico.

Analisando o estudo de Melo Neto (2022) percebe-se também um aumento da penetração com a adição do ácido graxo da borra do óleo de soja nos teores de 1, 3 e 5%, ou seja, nesta pesquisa já se esperava o mesmo comportamento, tendo em vista que o teor adicionado de ácido foi maior.

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.

Após análise dos dados obtidos no ensaio, foi possível notar que as amostras com a adição do agente modificador não se enquadram nos parâmetros estabelecidos em norma, diferentemente do ligante puro, que apresentou uma menor suscetibilidade ao envelhecimento. As amostras de ligante asfáltico 6%AGS apresentou um valor de penetração retida de 33,10%, 7%AGS de 46,97% e AB de 67,24%. Dessa forma, as amostras modificadas pelo AGS se apresentaram mais suscetíveis ao envelhecimento, corroborando com os dados de variação de massa obtidos no ensaio de RTFO.

5.3 Ponto de amolecimento

No ensaio de ponto de amolecimento foram obtidos os dados por meio de média de duas temperaturas, tanto antes quanto após o procedimento de RTFO, conforme apresentado na Tabela 4:

Tabela 4 - Ensaio de ponto de amolecimento – Método do anel e bola

AMOSTRA	PONTO DE AMOLECIMENTO (°C)	PONTO DE AMOLECIMENTO APÓS RTFO (°C)
AB	52,0	56,0
6%AGS	37,0	44,5
7%AGS	33,5	44,5

Fonte: Autor

O ponto de amolecimento é uma medida empírica que determina a consistência do ligante e determina a temperatura em que o ligante atinge uma certa condição de escoamento. Segundo Santos (2017), este parâmetro está relacionado com a manutenção das propriedades do ligante a elevadas temperaturas e ao aumento da resistência à deformação permanente.

Observando e comparando os resultados com o estudo de Melo Neto (2022), observa-se que os modificadores em todos os teores testados apresentaram redução do ponto de amolecimento, corroborando com os resultados, o que já era um resultado a ser esperado.

Os pontos de amolecimento menores são, de certa forma, interessantes, tendo em vista que esses modificadores podem ser empregados para uso em misturas asfálticas recicladas, confirmando a redução da rigidez a temperaturas menores.

5.4 Viscosidade rotacional

O ensaio de viscosidade rotacional foi realizado nas amostras com adição do ácido graxo da borra do óleo de soja antes e após o envelhecimento a curto prazo RTFO. Na Tabela 5 estão apresentados os resultados obtidos antes do envelhecimento a curto prazo nas temperaturas de 135°C, 142°C, 150°C, 165°C e 177°C.

Tabela 5 - Viscosidade rotacional antes do RTFO

AMOSTRA	135°C	142°C	150°C	165°C	177°C
AB	401,0	284,0	198,0	120,0	73,0
6%AGS	227,5	167,15	121,0	72,0	48,5
7%AGS	196,25	145,0	104,0	62,67	42,0

Fonte: Autor

Ao analisar os dados, percebeu-se que houve uma diminuição da viscosidade do ligante com o acréscimo de teores do ácido graxo da borra do óleo de soja, principalmente nas temperaturas mais baixas.

Na Tabela 6, estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de viscosidade rotacional após o envelhecimento a curto prazo RTFO.

Tabela 6 - Viscosidade rotacional após o RTFO

AMOSTRA	135°C	142°C	150°C	165°C	177°C
AB	548,0	391,0	269,0	144,0	94,0
6%AGS	333,75	242,15	172,0	97,665	64,75
7%AGS	311,25	227,85	164,0	92,335	63,0

Fonte: Autor

Analisando os resultados obtidos, foi possível notar a semelhança no comportamento com o ligante não envelhecido. Conforme o esperado, todas as amostras incorporadas com os teores do ácido graxo da borra do óleo de soja aumentaram a viscosidade após o envelhecimento.

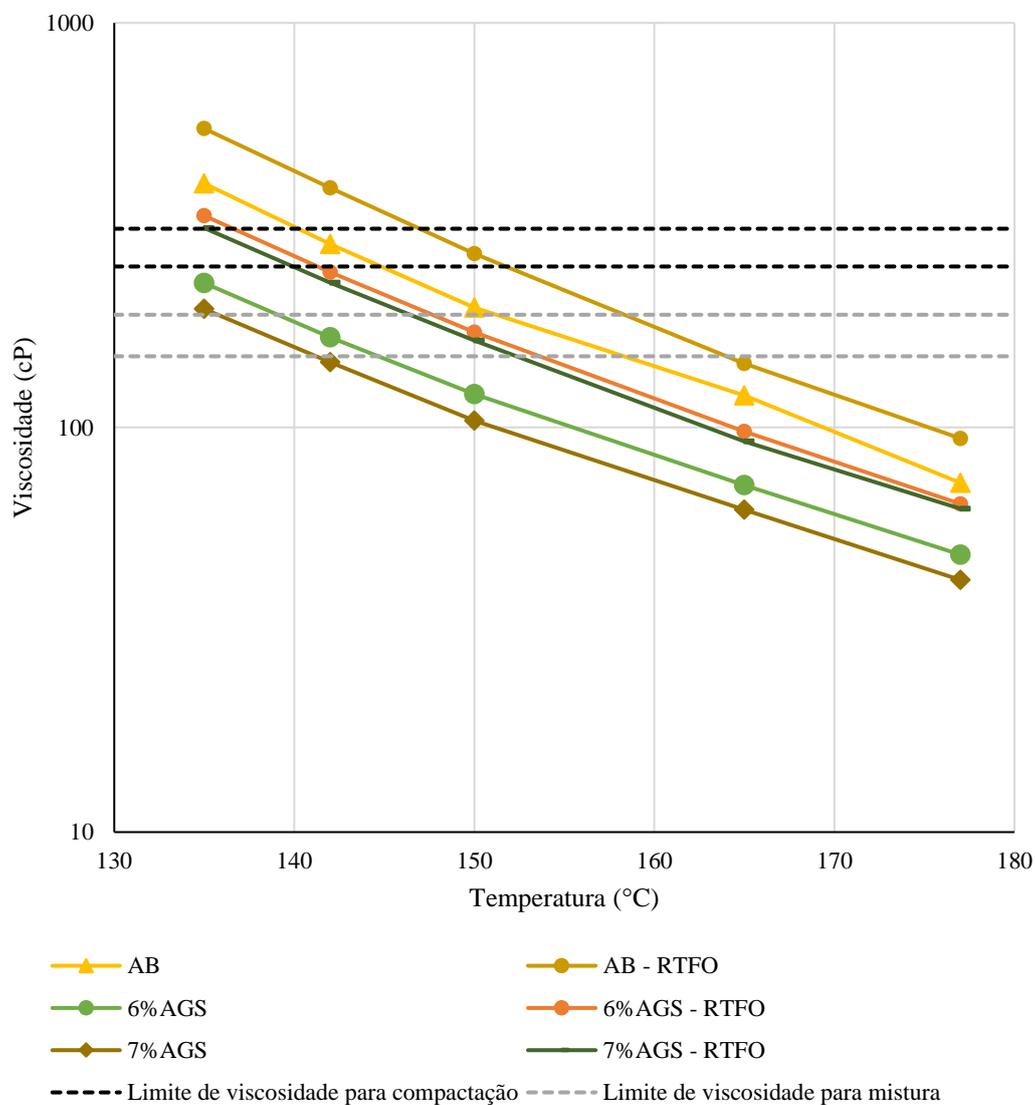
As temperaturas de mistura e compactação estão relacionadas à redução da viscosidade causada pela adição do ácido graxo da borra do óleo de soja. Assim, é importante verificar se houve redução dessas temperaturas para os teores testados. A temperatura de projeto do ligante asfáltico na produção de misturas asfálticas deve ser de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s para ligantes asfálticos convencionais testados no viscosímetro rotacional. Na Tabela 7 estão apresentadas as temperaturas de compactação e de mistura, encontradas após a análise dos gráficos da Figura 9.

Tabela 7 - Temperaturas de compactação e de mistura

AMOSTRA	TEMPERATURA DE COMPACTAÇÃO (°C)	TEMPERATURA DE MISTURA (°C)
AB	141 – 145	152 – 158
6%AGS	128 – 134	139 – 145
7%AGS	126 – 131	135 – 141
AB – RTFO	147 – 152	158 – 164
6%AGS – RTFO	136 – 142	148 – 154
7%AGS – RTFO	135 – 140	146 – 152

Fonte: Autor

Figura 9 - Temperatura de compactação e mistura



Fonte: Autor

Os resultados indicam que o acréscimo do ácido graxo da borra do óleo de soja tem um efeito de diminuição da viscosidade da mistura asfáltica e, portanto, na diminuição das temperaturas de compactação e de mistura.

Outro ponto percebido foi que após o envelhecimento a curto prazo, foi possível observar um aumento da viscosidade em relação ao material não envelhecido. O efeito rejuvenescedor do ácido graxo da borra do óleo de soja foi notável ao reduzir a viscosidade do ligante asfáltico puro envelhecido, apresentando uma redução significativa da viscosidade.

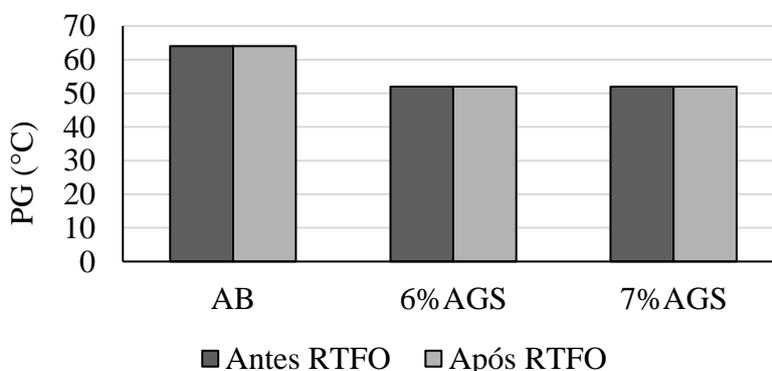
Os ligantes asfálticos modificados com o ácido graxo da borra do óleo de soja apresentaram valores de viscosidade fora dos limites especificados em norma, o que aponta o modificador nesses teores com grande eficácia no processo de redução da rigidez, favorecendo seu uso como agente rejuvenescedor para misturas asfálticas recicladas.

5.5 Grau de desempenho (PG)

No ensaio de grau de desempenho foi dispensado a realização do ensaio para a determinação da temperatura mínima de PG, por causa do clima tropical do país e da não ocorrência de temperaturas negativas.

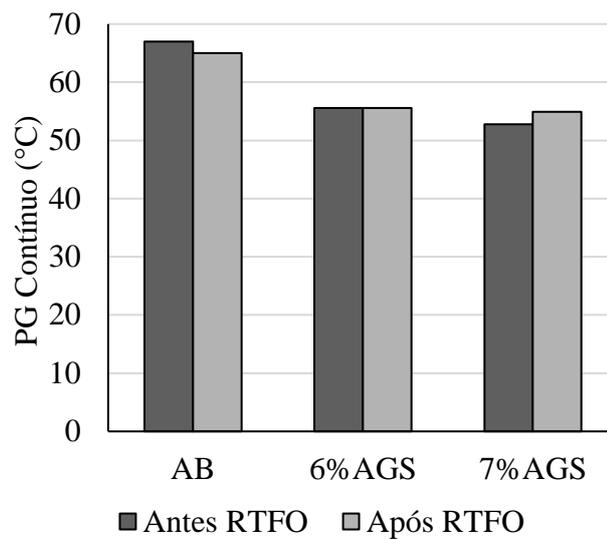
As figuras 10 e 11 apresentam os resultados das temperaturas de PG e PG contínuo antes e após o envelhecimento a curto prazo.

Figura 10 - Grau de desempenho dos ligantes asfálticos puro e modificados: PG



Fonte: Autor

Figura 11 - Grau de desempenho dos ligantes asfálticos puro e modificado: PG contínuo

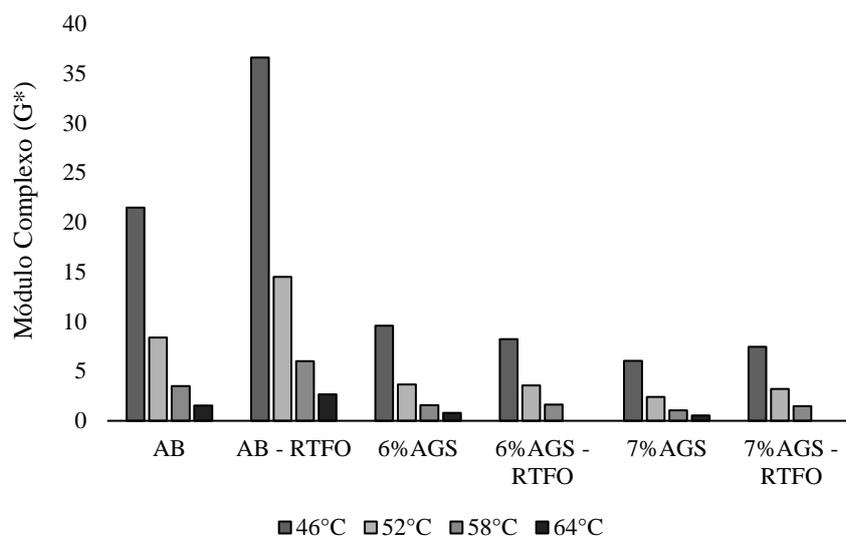


Fonte: Autor

Observando os dados, foi possível notar que as amostras com adição do ácido graxo da borra do óleo de soja apresentam redução na temperatura de PG antes e após o RTFO. As amostras reduziram dois degraus na temperatura de PG, passando de 64°C para 52°C, apontando o modificador como redutor de viscosidade e apresentando comportamento rejuvenescedor para uso em misturas asfálticas recicladas.

O ácido graxo da borra do óleo de soja se apresentou como modificador com características rejuvenescedoras, apresentando resultados semelhantes ao de Melo Neto (2022).

A Figura 12 apresenta a variação do parâmetro Módulo Complexo (G^*) das amostras em função da temperatura.

Figura 12 - Parâmetro Módulo Complexo (G^*) em função da temperatura antes e após RTFO

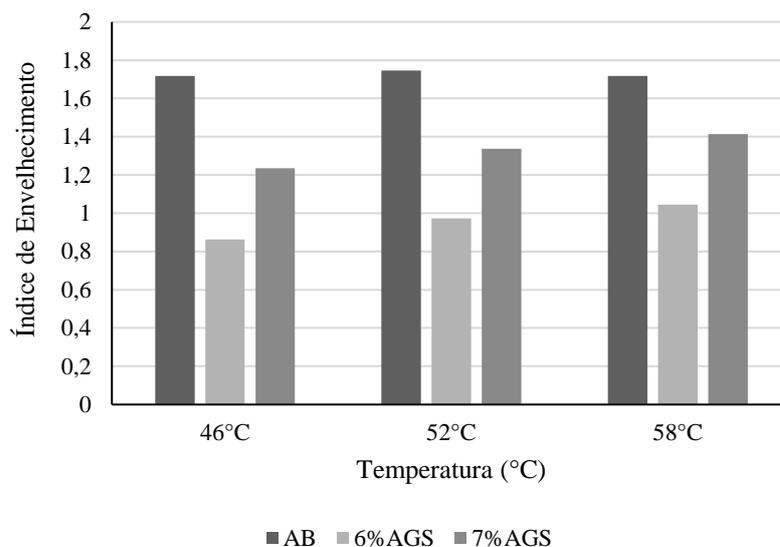
Fonte: Autor

Os ligantes asfálticos modificados apresentaram módulos complexos menores com a elevação da temperatura. Esse resultado aponta uma menor rigidez dos ligantes com a adição do ácido graxo da borra do óleo de soja. Assim, o desempenho reológico foi inferior ao ligante puro.

A pesquisa de Melo Neto (2022) corrobora novamente com os resultados deste estudo. De forma clara, os valores do Módulo Complexo de todas as amostras de ligantes modificados permaneceram com valores inferiores aos da amostra de ligante asfáltico puro mesmo após o RTFO, indicando uma perda de rigidez.

A Figura 13 apresenta os valores do índice de envelhecimento (AI) obtidos através da relação entre os parâmetros $G^*/(\text{sen}\delta)$ dos ligantes antes e após o RTFO.

Figura 13 - Índice de envelhecimento das amostras de ligante asfáltico



Fonte: Autor

Analisando os dados apresentados na Figura 13, é possível apontar que os modificadores apresentaram melhor desempenho nas maiores temperaturas testadas, inferindo uma boa atuação dos modificadores no ligante asfáltico em temperaturas mais altas. Os ligantes asfálticos modificados com o ácido graxo da borra do óleo de soja apresentaram menos suscetibilidade ao envelhecimento oxidativo.

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

A realização do ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla possibilita a avaliação do percentual de recuperação, da compliância não-recuperável e a diferença percentual entre as compliâncias não-recuperáveis.

A Tabela 8 apresenta os dados obtidos no ensaio MSCR realizado na temperatura de PG do ligante (64°C), porém, o teste também foi realizado nas temperaturas máximas de PG obtidas para as amostras modificadas.

Tabela 8 - Parâmetros obtidos no teste de fluência e recuperação sob tensão múltipla

Amostra	Temperatura de ensaio (°C)	Percentual de recuperação (%)		Compliancia não recuperável Jnr (kPa ⁻¹)		Jnr, diff (%)
		0.1 kPa	3.2 kPa	0.1 kPa	3.2 kPa	
AB	64	5,03	0,37	3,4	3,83	12,68
6% AGS	64	-4,04	-0,75	12,8	13,2	2,85
7% AGS	64	-0,42	-0,89	14,7	15,8	8,01
6% AGS	52	15,12	1,11	1,99	2,51	26,43
7% AGS	52	2,54	0,59	3,030	3,27	4,98

Fonte: Autor

Observa-se na Tabela 8 que os valores de percentual de recuperação para as amostras de ligante asfáltico modificado com ácido graxo da borra do óleo de soja nos teores de 6 e 7% se apresentaram negativas. Esse comportamento não foi observado no estudo de Melo Neto (2022) com a adição de até 5% de ácido graxo.

A recuperação percentual é indicativa da capacidade de um ligante asfáltico para restaurar sua deformação após a remoção da carga de fluência. A partir de uma perspectiva física, o valor da recuperação percentual para qualquer tipo do aglutinante asfáltico deve ser não negativo. Uma possível explicação para o resultado negativo do percentual de recuperação é o comportamento de fluência terciária resultante de tensão extremamente grande, o que faz o ligante fluir mesmo em zero tensão. O fluxo terciário é mais dominante em altas temperaturas e alta tensão. Portanto, menor temperatura e/ou menor tensão deve ser aplicado para evitar uma recuperação percentual negativa. Nesse caso, os valores de percentual de recuperação para as amostras modificadas na temperatura de PG do ligante puro (64°C) podem ser considerados zero. Quando o ensaio é realizado na temperatura de PG (52°C) de cada amostra modificada, pode-se observar valores de recuperação comuns, pelo fato de o ensaio ter sido realizado em uma temperatura mais baixa.

Analisando os resultados de Jnr obtidos, é possível notar que não houve uma mudança brusca entre as tensões de 0,1 kPa e de 3,2 kPa. De acordo com a classificação da AASHTO M320, o ligante puro pode ser classificado para tráfego padrão, enquanto os ligantes adicionados teores de 6% e 7% do ácido graxo da borra do óleo de soja não se encaixam na classificação por causa dos altos valores de Jnr encontrados.

O principal objetivo da análise do ligante asfáltico modificado com o ácido graxo da borra do óleo de soja foi verificar o potencial desse material como agente rejuvenecedor para misturas asfálticas recicladas. Logo, os altos valores de Jnr obtidos serão compensados no produto final do ligante asfáltico presente na mistura asfáltica reciclada.

Outro ponto importante no ensaio MSCR é o Jnr diferencial, que é a medida da diferença entre os Jnr a 0,1kPa e 3,2kPa. Os valores de Jnr, diff para os ligantes asfálticos puro e modificados têm a função de mostrar a sensibilidade dos materiais ao aumento dos níveis de tensão e deve permanecer abaixo de 75%, conforme AASHTO M320 (2017). Logo, na faixa de temperatura estudada tanto o ligante puro, quanto o ligante modificado com o ácido graxo da borra do óleo de soja apresentaram valores inferiores a 75%, deixando evidente que o material do estudo é adequado para a utilização nessa faixa de temperatura.

6 CONCLUSÃO

Neste tópico serão apresentadas as conclusões obtidas por meio desse estudo, bem como sugestões para trabalhos futuros envolvendo o mesmo objeto de pesquisa.

6.1 Considerações finais

A avaliação física empírica e reológica do ligante asfáltico modificado com o ácido graxo da borra do óleo de soja permitiu apontar algumas conclusões:

Ao medir e analisar a perda de massa antes e após o RTFO, foi notado que as amostras modificadas com o ácido graxo da borra do óleo de soja não se enquadraram nas especificações da norma, ultrapassando o limite de 0,5%.

O ligante asfáltico modificado pelo ácido graxo da borra do óleo de soja apresentou um aumento nos valores de penetração e redução no ponto de amolecimento, antes e após RTFO, nos teores de 6% e 7%, quando comparado ao ligante puro.

Os resultados obtidos no ensaio de viscosidade rotacional, possibilitou verificar que quanto maior a quantidade do modificador, menor é a viscosidade apresentada e, portanto, menor são as temperaturas de compactação e de mistura. Foi possível notar também que após o RTFO houve um aumento geral na viscosidade.

Ainda sobre os resultados obtidos no ensaio de viscosidade, observou-se que os ligantes asfálticos modificados com o ácido graxo da borra do óleo de soja apresentaram valores de viscosidade fora dos limites especificados em norma, o que aponta o modificador nesses teores com grande eficácia no processo de redução da rigidez, favorecendo seu uso como agente rejuvenescedor para misturas asfálticas recicladas.

Os resultados físicos empíricos e reológicos encontrados, corroboraram com o efeito rejuvenescedor do ácido graxo da borra do óleo de soja como modificador no ligante asfáltico. O ácido graxo da borra do óleo de soja conseguiu reduzir a temperatura máxima de PG do ligante asfáltico em dois degraus nos dois teores testados, atingindo 52°C de PG e menor índice de envelhecimento.

A partir do ensaio de MSCR, observou-se resultados de Jnr bastante elevados para ambos os teores de adição do agente modificador, quando utilizados e misturados ao ligante rígido presente no RAP, se tornam viáveis, compensando a rigidez do ligante do RAP.

Dessa forma, a adição do ácido graxo da borra do óleo de soja como agente rejuvenecedor ao ligante asfáltico se caracteriza como uma alternativa sustentável, de baixo custo comercial e com potencial rejuvenecedor para as misturas asfálticas recicladas.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas com o ácido graxo da borra do óleo de soja nos teores propostos.
- Investigar o comportamento físico empírico e reológico do ligante asfáltico com maiores teores de ácido graxo para verificar uma maior redução do PG.
- Realizar um estudo de viabilidade ambiental com misturas asfálticas recicladas e ácido graxo da borra do óleo de soja.
- Investigar o custo de produção de misturas asfálticas recicladas com o uso de 6 e 7% de ácido graxo da borra do óleo de soja.

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 2872: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). Estados Unidos, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 36M-14: Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). Estados Unidos, 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 4402M: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. Estados Unidos, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 5M: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. Estados Unidos, 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 6373: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. Estados Unidos, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 7405: Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. Estados Unidos, 2020.
- ANUÁRIO CNT DE TRANSPORTE. Estatísticas consolidadas 2019 – Brasília: CNT, 2019.
- ARÁMBULA-MERCADO, E.; KASEER, F.; MARTIN, A.E.; YIN, F.; CUCALON, L.G. Evaluation of recycling agent dosage selection and incorporation methods for asphalt mixtures with high RAP and RAS contents. *Construction and Building Materials*, v. 158, p. 432-442, 2018.
- ARAÚJO, A. M. Borra de óleo de soja: caracterização físico-química e avaliação da potencialidade econômica. Monografia (Engenharia de Petróleo). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

BAGHAEE MOGHADDAM, T.; BAAJ, H. The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: a systematic review. *Construction and Building Materials*, v. 114, p. 805-816, 2016.

BENACHIO, G. L. F., FREITAS, M. d. C. D., TAVARES, S. F. Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, v. 260, 121046, 2020.

BERNUCCI, L. B; MOTTA L. M. G. da; CERATTI J. A. P.; SOARES J. B. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro, 2008. 338 p., ISBN 85-85227-84-2.

CASEY, D.; MCNALLY, C.; GIBNEY, A.; GILCHRIST, M. D. Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 52, n. 10, p. 1167-1174, 2008.

CHIU, C.T.; HSU, T.H.; YANG, W.F. Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 52, n. 3, p. 545- 556, 2008.

CONAB. Observatório Agrícola – Acompanhamento da safra brasileira de grãos. v. 3, Safra 2015/2016, n. 4, 154 p. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_01_12_09_00_46_boletim_graos_janeiro_2016.pdf>. Acesso em: 08 maio 2016.

CUNHA, C. B.; BUDNY, J.; KLAMT, R. A.; CENTOFANTE, R.; BARONI, M. Avaliação de concreto asfáltico usinado a quente com incorporação de material fresado. *Revista Matéria*, v. 23, n. 3, 2018.

DE VOS, J. WITLOX, F. Transportation policy as spatial planning tool; Reducing urban sprawl by increasing travel costs and clustering infrastructure and public transportation. *Journal of Transport Geography*, 2013.

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

DIB, M. H. M. Fundamentos do Fresamento: uma aplicação em microfresamento. Dissertação (Mestrado em Manufatura). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

DURANTON, G. PUGA, D. The growth of cities. CEPR discussion paper 9590, 2013.

FERROTTI, G.; RAGNI, D.; LU, X.; CANESTRARI, F. Effect of warm mix asphalt chemical additives on the mechanical performance of asphalt binders. *Materials and Structures*, v. 5, n. 5, p. 226, 2017.

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.

GAO, J.; WANG, H.; YOU, Z.; HASAN, M. R. M. Research on properties of bio-asphalt binders based on time and frequency sweep test. *Construction and Building Materials*, v. 160, 2018.

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

LEAL, C. L. D. Aproveitamento do bagaço de cana de açúcar em misturas asfálticas. 2013. 219f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tese) – Tecnologia da Construção, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

LEITE, L. F. M. Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero. Tese de Doutorado, IMA/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 1999.

LI, Y.; SHEN, A.; LYU, Z.; WANG, S.; FORMELA, K.; ZHANG, G. Ground tire rubber thermo-mechanically devulcanized in the presence of waste engine oil as asphalt modifier. *Construction and Building Materials*, v. 222, p. 588–600, 2019.

LINS, V.; ARAÚJO, M.; YOSHIDA, M.; FERRAZ, V.; ANDRADA, D.; LAMEIRAS, F.: Photodegradation of hot-mix asphalt. *Fuel*, v. 87, 15–16, p. 3254–3261, 2008.

LUCENA, M. C. C. Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros. 2005. 163f. Tese (Doutorado em Química Inorgânica). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

MAG, T. K.; GREEN, D. H.; KWONG, A. T. Continuous acidulation of soapstock and recovery of acid oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. v. 59, n. 4, p. 1008-1011, 1982.

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.

MIRÓ, R.; MARTÍNEZ, A.; MORENO-NAVARRO, F.; CARMEN RUBIO-GÁMEZ, M. Effect of ageing and temperature on the fatigue behaviour of bitumens. *Materials & Design*, v. 86, p. 129 – 137, 2015.

MOGAWER, W.; BENNERT, T.; DANIEL, J. S.; BONAQUIST, R.; AUSTERMAN, A.; BOOSHEHRIAN, A. Performance characteristics of plant produced high rap mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, v. 13, n. 1, p. 183–208, 2012.

MORETTO, E.; FETT, R.; Tecnologia de Óleos e Gorduras Vegetais na Indústria de Alimentos. São Paulo: Ed. Varela, 1998.

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.

PERL, M.; UZAN, J.; SIDES, A. Visco-elasto-plastic constitutive law for a bituminous mixture under repeated loading. *Transportation Research Record*, v. 911, p. 20-26, 1983.

PRADHAN, S. K.; SAHOO, U. C. Influence of softer binder and rejuvenator on bituminous mixtures containing reclaimed asphalt pavement (RAP) material. *International Journal of Transportation Science and Technology*, v. 7, 2020.

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

RELATÓRIO ANUAL DA CNT. Briefing para a imprensa 2017 – Brasília: CNT, 2017.

REZENDE, D. F. Estudo comparativo de características físico-químicas e nutricionais da soja preta e amarela. 2012. 118 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos). Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.

RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, I.; LIZASOAIN-ARTEAGA, E.; LASTRA-GONZÁLEZ, P.; CASTRO-FRESNO, D. Mechanical, environmental and economic feasibility of highly sustainable porous asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, v. 251, 118982, 2020.

ROSA JÚNIOR, J. M.; Estudo das propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo (cap50/70) modificado com polímeros funcionalizados, 2015. Dissertação de mestrado-Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.

SALEHI, S.; ARASHPOUR, M.; KODIKARA, J.; GUPPY, R. Sustainable pavement construction: A systematic literature review of environmental and economic analysis of recycled materials. *Journal of Cleaner Production*, v. 313, n. 127936, 2021.

SANTERO, N. J.; MASANET, E.; HORVATH, A. Life-cycle assessment of pavements. Part I: critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 55, n. 9, p. 801-809, 2011b.

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

SHAHBANDEH, M. Production of major vegetable oils worldwide from 2012/13 to 2020/2021, by type (in million metric tons). Statista, 2021. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/263933/production-of-vegetable-oils-worldwide-since2000/#:~:text=The%20production%20volume%20of%20vegetable,200%20million%20metric%20tons%20worldwide>>. Acesso em: 25 de mai de 2022.

SINGH, S.; RANSINCHUNG, G. Durability properties of pavement quality concrete containing fine RAP. *Advances in Civil Engineering Materials*, v. 7, n. 1, p. 271-290, 2018.

SOBREIRO, F. P. Efeito da adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com copolímero SBS. 2014. 346 f. Tese

(Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

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

TOMASIELLO, D. B.; GIANNOTI, M.; FEITOSA, F. ACCESS: An agent-based model to explore job accessibility inequalities. Computers Environment and Urban Systems, v. 81, p. 101462. 2020.

VAN HAPEREN, W., RAIZ, M. S., DANIELS, S., SAUNIER, N., BRIJS, T., WETS, G. Observing the observation of (vulnerable) road user behaviour and traffic safety: A scoping review. Accident Analysis & Prevention. 123. 211-221, 2019.

YUAN, Q.; LIU, Z.; ZHENG, K.; MA, C. Chapter 7 – Asphalt. Civil Engineering Materials, p. 287-325, 2021.

ZHANG, H., ZHU, C., YU, J., SHI, C., & ZHANG, D. Influence of surface modification on physical and ultraviolet aging resistance of bitumen containing inorganic nanoparticles. Construction and Building Materials, 98, 735–740. 2015.

ZIEGLER, C, R. Avaliação da Adição do Óleo de Algodão Bruto nas Propriedades Reológicas do Cimento Asfáltico de Petróleo. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2017.