



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

ALEX GUEDES DE AMORIM

ANÁLISE DE UMA MISTURA ASFÁLTICA RECICLADA COM ÁCIDO GRAXO
DA BORRA DO ÓLEO DE SOJA

ARARUNA

2022

ALEX GUEDES DE AMORIM

**ANÁLISE DE UMA MISTURA ASFÁLTICA RECICLADA COM ÁCIDO GRAXO
DA BORRA DO ÓLEO DE SOJA**

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

Área de concentração: Pavimentação

Orientador: Prof. Me. Osires de Medeiros Melo Neto

**ARARUNA
2022**

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

A524a Amorim, Alex Guedes de.
Análise de uma mistura asfáltica reciclada com ácido graxo da borra do óleo de soja [manuscrito] / Alex Guedes de Amorim. - 2022.
67 p. : il. colorido.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde , 2022.
"Orientação : Prof. Me. Osires de Medeiros Melo Neto ,
Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."

1. Pavimento asfáltico . 2. Custos. 3. Óleo de soja. I.
Título

21. ed. CDD 625.7

ALEX GUEDES DE AMORIM

ANÁLISE DE UMA MISTURA ASFÁLTICA RECICLADA COM ÁCIDO GRAXO DA
BORRA DO ÓLEO DE SOJA

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

Área de concentração: Pavimentação

Aprovado em: 06/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

Osires de Medeiros Melo Neto

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

Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

Prof. Dra. Ana Maria Gonçalves Duarte (Examinador Externo)
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Albaniza Maria da Silva Lopes

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

Yáscara Maia Araújo de Brito

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

Dedico este trabalho aos meus pais, Alexandre Guedes e Geane de Amorim, por me incentivarem e vibrarem por cada conquista minha.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido a dádiva da vida e por me guiar nas escolhas e decisões mais sensíveis.

Aos meus pais, Alexandre Guedes e Geane de Amorim, pelo amor incondicional, carinho, conselhos e apoio dado nos momentos mais difíceis, e pelo exemplo que são de pessoas que me guiaram para tornar-me o ser humano que sou hoje.

À minha noiva, Deize Epifânio, que sempre esteve ao meu lado durante essa jornada me incentivando e dando forças para continuar apesar das dificuldades.

Ao amigo e irmão que a vida me presenteou, Filipe Kelsen, pela amizade, conselhos e momentos de alegrias que fizeram das dificuldades impostas menos árduas.

Ao amigo e irmão de longa data, Filipe Henrique, pela amizade, momentos de alegria e por torcer por minha trajetória.

Ao professor e orientador, Osires de Medeiros Melo Neto, pelos conhecimentos e experiências passadas nas disciplinas da graduação, pela paciência e disponibilidade para sanar dúvidas, e por não medir esforços para a realização deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos, Eryclapton Gomes, Evandro Lúcio, Maria Ana Fernandes e Maria Luíza Paulino, por toda a ajuda prestada nesses 5 anos de graduação, pelos momentos de alegria e pela amizade construída.

Aos amigos que a Engenharia Civil me apresentou, Matheus Cassiano e Michaelson Souza, pelos conhecimentos compartilhados, pela ajuda dada quando solicitada e pelos momentos de alegria.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão do curso de Engenharia Civil e que torceram por mim.

À UFCG por viabilizar a realização deste trabalho permitindo o uso do Laboratório de Engenharia de Pavimentos para a realização dos ensaios da minha pesquisa.

À IMCOPA pela doação da borra do óleo de soja para a realização dos ensaios deste estudo.

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano.”

Isaac Newton

RESUMO

No âmbito da pavimentação, o pavimento asfáltico reciclado, do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), vem sendo estudado para ser utilizado na produção de misturas asfálticas a quente. O emprego de elevados teores de RAP em misturas asfálticas resulta na maior suscetibilidade a falhas sob baixas temperaturas e ao dano por fadiga. A adição de agentes rejuvenescedores à mistura asfáltica reciclada com a utilização de RAP se mostra necessário para contornar essas desvantagens, agindo como compostos que regeneram as propriedades do ligante envelhecido. Assim, esta pesquisa analisou o uso do ácido graxo da borra do óleo de soja (AGBS) - material oriundo da borra do óleo de soja, resíduo gerado na etapa de refino do óleo de soja - como agente rejuvenescedor para misturas asfálticas recicladas, sendo realizada uma análise do desempenho mecânico e estimativa de custo da mistura asfáltica. O ligante asfáltico com penetração 50/70 (PG 64-XX) utilizado neste estudo foi modificado com o AGBS no teor de 7% por peso do ligante. Para fins de comparação de desempenho mecânico, foram realizados ensaios de resistência à tração, dano por umidade, módulo de resiliência e vida de fadiga de duas misturas asfálticas, uma mistura asfáltica de controle, composta unicamente por materiais virgens, e uma mistura asfáltica reciclada produzida com 40% de RAP e com o ligante modificado pelo AGBS. A verificação da significância dos dados foi realizada por meio do teste estatístico t de student. Além disso, foi realizado uma estimativa de custo de produção da mistura asfáltica de controle e da mistura asfáltica reciclada para fins comparativas. A utilização do ácido graxo da borra do óleo de soja não apenas viabilizou o uso do RAP como também atribuiu à mistura asfáltica desempenho mecânico superior à mistura asfáltica de controle em todos os ensaios mecânicos realizados neste estudo. Ademais, a mistura asfáltica reciclada apresentou custo de produção inferior à mistura asfáltica de controle.

Palavras-chave: Agente rejuvenescedor. Pavimento asfáltico reciclado. Desempenho mecânico. Estimativa de custos. Test-t.

ABSTRACT

In pavement, recycled asphalt pavement, from the English Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), has been studied for use in the production of hot asphalt mixtures. The use of high contents of RAP in asphalt mixtures results in greater susceptibility to failures at low temperatures and damage due to fatigue. The addition of rejuvenating agents to the recycled asphalt mixture using RAP is necessary to overcome these disadvantages, acting as compounds that regenerate the properties lost by the aged binder. Thus, this research analyzed the use of fatty acid from soy oil sludge (AGBS) - material derived from soy oil sludge, a residue generated in the refining stage of soy oil - as a rejuvenating agent for recycled asphalt mixtures, being carried out an analysis of the mechanical performance and cost estimate of the asphalt mix. The asphalt binder with 50/70 penetration (PG 64-XX) used in this study was modified with AGBS at a level of 7% by weight of the binder. In order to compare the mechanical performance, tensile strength, moisture damage, resilient modulus, and fatigue life tests were carried out on two asphalt mixtures, a control asphalt mixture, composed solely of virgin materials, and a recycled asphalt mixture produced with 40% RAP and with the ligand modified by AGBS. The verification of the significance of the data was performed using the Student's t-test. In addition, an estimate of the production cost of the control asphalt mixture and the recycled asphalt mixture was carried out for comparative purposes. The use of fatty acid from soy oil sludge not only made the use of RAP possible but also gave the asphalt mixture a superior mechanical performance over the control asphalt mixture in all mechanical tests carried out in this study. Furthermore, the recycled asphalt mixture had a lower production cost than the control asphalt mixture.

Keywords: Rejuvenating agent. Recycled asphalt pavement. Mechanical performance. Cost estimate. t-test.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Equipamentos para fresar revestimentos asfálticos	21
Figura 2: Fluxograma do processo de refino dos óleos e gorduras	27
Figura 3: Fluxograma geral do programa experimental.....	29
Figura 4: Curva granulométrica dos agregados naturais	30
Figura 5: Curvas granulométricas dos agregados RAP	32
Figura 6: Etapas do processo de acidulação da borra do óleo de soja.....	36
Figura 7: Ácido graxo da borra do óleo de soja	37
Figura 8: Curvas granulométricas, zona de restrição, pontos de controle e limites faixa C ...	39
Figura 9: Teor ideal de RAP para a mistura reciclada.....	41
Figura 10: Ensaio LOTTMAN: a) Corpos de prova sendo submersos na água a uma temperatura de 60°C; b) Preparo dos corpos de prova para o processo de congelamento.	43
Figura 11: Ensaio de compressão diametral sob carga repetida.....	44
Figura 12: Ensaio de tração por compressão diametral.....	48
Figura 13: Comparação do RT com a literatura	49
Figura 14: Resistência retida à tração das misturas asfálticas	51
Figura 15: Módulo de resiliência das misturas asfálticas	53
Figura 16: Número de ciclos suportados versus diferença de tensão	55
Figura 17: Número de ciclos suportados versus deformação resiliente inicial	55
Figura 18: Custo de produção das misturas asfálticas por km de rodovia	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização dos agregados naturais obtidos	31
Tabela 2: Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados do RAP	32
Tabela 3: Caracterização físico e reológica do ligante asfáltico envelhecido do RAP	33
Tabela 4: Caracterização do ligante asfáltico virgem.....	34
Tabela 5: Caracterização da borra do óleo de soja	35
Tabela 6: Composição granulométrica das misturas asfálticas de controle	38
Tabela 7: Parâmetros volumétricos das misturas com teor de ligante inicial.....	39
Tabela 8: Parâmetros volumétricos da mistura de projeto.....	40
Tabela 9: Percentual dos materiais e parâmetros da dosagem da mistura asfáltica reciclada .	41
Tabela 10: Parâmetros do teste estatístico para o ensaio RT.....	50
Tabela 11: Parâmetros estatísticos para o ensaio de RRT.....	52
Tabela 12: Parâmetros estatísticos do ensaio de MR	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Composição de custo das misturas asfálticas.....	57
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AGBS	Ácido Graxo da Borra do Óleo de Soja
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
AOCS	<i>American Oil Chemists' Society</i>
AR	Agentes Rejuvenescedores
ARE	Agentes de Reciclagem Emulsionados
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CGS	Compactador Giratório Superpave
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo de Prova
CPA	Camada Porosa de Atrito
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
GC-MS	<i>Gas Chromatograph Mass Spectrometer</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducer</i>
MR	Módulo de Resiliência
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
PG	<i>Performance Grade</i>
PRI	<i>Pavement Rejuvenation International</i>
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RRT	Resistência Retida à Tração
RT	Resistência à Tração
RTFO	<i>Rolling Thin-Film Oven</i>
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
SUPERPAVE	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
UV	Ultravioleta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	16
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivos Gerais</i>	16
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Revestimento Asfáltico	17
2.2	Defeitos dos Revestimentos Asfálticos	18
2.3	Misturas Asfálticas Recicladas	20
2.4	Agentes Rejuvenescedores	23
2.5	Borra do Óleo de Soja e Ácido Graxo da Borra do Óleo de Soja	26
2.6	Custo de Produção de Misturas Asfálticas	28
2.7	Ponderações	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	Materiais	30
<i>3.1.1</i>	<i>Agregados Naturais</i>	30
<i>3.1.2</i>	<i>RAP</i>	31
<i>3.1.3</i>	<i>Ligante Asfáltico Virgem</i>	34
<i>3.1.4</i>	<i>Ácido Graxo da Borra do Óleo de Soja</i>	35
3.2	Métodos Experimentais	37
<i>3.2.1</i>	<i>Modificação do Ligante Asfáltico</i>	37
<i>3.2.2</i>	<i>Dosagem da Mistura Asfáltica</i>	38
<i>3.2.3</i>	<i>Dosagem da Mistura Asfáltica Reciclada</i>	40
<i>3.2.4</i>	<i>Ensaio Mecânicos das Misturas Asfálticas</i>	42
3.3	Teste Estatísticos	45
3.4	Estimativas do Custo de Produção	46
4	RESULTADOS	47
4.1	Resistência à Tração	47
4.2	Dano por Umidade Induzida (LOTTMAN)	50
4.3	Módulo de Resiliência (MR)	52
4.4	Resistência à Fadiga	54
4.5	Estimativa do Custo de Produção	56
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	59
5.1	Considerações Finais	59
5.2	Sugestões para Pesquisas Futuras	60
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

O modal rodoviário é o mais utilizado no transporte de cargas e de pessoas no Brasil, sendo vital para a logística nacional a ampliação da malha rodoviária e desenvolvimento de novas tecnologias nessa área. Segundo a Confederação Nacional do Transporte – CNT, em 2021 o orçamento público para investimento em transporte no Brasil foi de 8,69 bilhões de reais, parcela considerável do investimento em infraestrutura do Governo Federal.

O pavimento asfáltico flexível é o mais empregado no Brasil, o qual possui como característica a deformação elástica quando submetida a um carregamento aplicado, distribuindo as tensões em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas constituintes do revestimento asfáltico (DNIT, 2006). Ações do meio ambiente como grandes variações de temperatura, características dos materiais utilizados e a forma de execução do projeto são as principais causas do desgaste do revestimento asfáltico. Esses fatores podem ocasionar o aparecimento de fissuras, sendo necessário a realização de intervenções para repará-las (GASPAR; PINHEIRO, 2021). O reparo consiste na remoção da camada de revestimento por meio de equipamento especial – fresadora – e aplicar uma nova camada de revestimento (BERNUCCI *et al.*, 2022).

O *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) é o produto oriundo da fresagem da camada de revestimento asfáltico degradada, com potencial reciclável, contendo em sua composição material agregada e ligante asfáltico (MOHAMMADFZALI *et al.*, 2017). A reutilização desse material traz benefícios não apenas para o meio ambiente, mas também para a construção, gerando redução de custos na aquisição de agregados e ligantes asfálticos virgens. Tendo em vista um mercado cada vez mais competitivo e oneroso, é fundamental a fomentação de uma economia circular com aplicação de materiais reciclados, utilizando-se dessas matérias-primas para novos empreendimentos, gerando economia e aprimoramento tecnológicos no que tange a utilização do RAP na produção do pavimento asfáltico (WRÓBEL *et al.*, 2020).

Com o passar do tempo, com a exposição a agentes ambientais e a ação de carregamento de tráfego de veículos, o pavimento asfáltico é submetido ao processo de envelhecimento, perdendo a flexibilidade do ligante, tornando-se quebradiço e mais propenso ao surgimento de rachaduras; e os componentes voláteis dos ligantes asfálticos convertem-se em compostos menos voláteis (ZAHOOR, 2021). Quando a mistura asfáltica é produzida com a incorporação de RAP com dosagem superior a 20%, em comparação com mistura asfáltica composta por materiais virgens, a camada asfáltica apresenta aumento da deterioração por

fadiga e mais suscetibilidade ao surgimento de fissuras a baixas temperaturas (XINXIN et al, 2018).

A incorporação de aditivos rejuvenescedores à mistura asfáltica reciclada é fundamental para a viabilizar a utilização do RAP. Esses aditivos têm a capacidade de recuperar o comportamento reológico do ligante envelhecido, melhorando o desempenho mecânico a longo prazo (ZHANG *et al.*, 2020). Diante dessa importância, diversos pesquisadores desenvolveram estudos com a finalidade de averiguar a ação desses agentes rejuvenescedores em misturas asfálticas recicladas.

A borra do óleo de soja, subproduto do processo de refino de óleo de soja e é produzida na etapa de neutralização do refino do óleo bruto, é fonte de ácidos graxos livres que têm potencial de redução de viscosidade de ligantes asfálticos. Devido à alta concentração de ácidos graxos, grande disponibilidade no mercado e baixo custo, a borra torna-se uma alternativa de matéria-prima sustentável para a produção de agentes rejuvenescedores (AR) (SEIDEL; HADDOCK, 2014).

O estudo realizado por Yu *et al.* (2014) analisou dois ligantes asfálticos diferentes, AAD (PG 58-28) e ABD (PG 58-10), os quais foram envelhecidos e rejuvenescidos por dois agentes rejuvenescedores diferentes, extrato aromático e resíduos vegetais, muito utilizados para essa finalidade. No estudo, os ligantes virgens, envelhecidos e rejuvenescidos tiveram suas propriedades reológicas testadas por meio do reômetro de cisalhamento dinâmico e de feixe de flexão. Os resultados apontaram que as características de massa (módulo complexo e viscosidade) dos aglutinantes rejuvenescidos assemelhavam-se aos aglutinantes virgens não envelhecidos, indicando os benefícios de seus usos.

A pesquisa realizada por Osmari e Aragão (2016) analisa resíduo de um óleo vegetal com agente rejuvenescedor de uma ligante asfáltico. O viscosímetro rotacional e o reômetro de cisalhamento dinâmico foram utilizados para caracterizar a viscosidade, módulo de cisalhamento dinâmico e o ângulo de fase em três condições: virgem, envelhecido e rejuvenescido pela adição de óleo vegetal. Os resultados apontaram que o resíduo de óleo vegetal é eficiente para ser empregado com agente rejuvenescedor, recuperando as características originais do ligante envelhecido, reduzindo sua viscosidade e sua rigidez e aumentando o seu ângulo de fase a níveis semelhantes aos ligantes virgens.

Melo Neto (2022) desenvolveu um trabalho que buscou avaliar o uso do ácido graxo da borra do óleo de soja (AGBS) como um agente rejuvenescedor, com teores de 0%, 3% e 5%, para misturas asfálticas recicladas com 40% de RAP. Além disso, avaliou a viabilidade técnica, econômica e ambiental do ácido nesses teores. Os resultados mostraram que o AGBS possui

efeitos rejuvenescedores, os quais melhoraram a resistência à deformação permanente e o desempenho à fadiga das misturas recicladas. Para um estudo mais completo sobre o AGBS, é interessante analisar o comportamento mecânico e econômico de misturas asfálticas recicladas com teor desse ácido superior a 5%, visando avaliar sua viabilidade nessas condições. Ou seja, verificar se o uso de um teor mais elevado acarreta ganho mecânico à mistura asfáltica e se influencia no custo de produção dessas misturas.

Assim, este trabalho teve como objetivo investigar o desempenho mecânico de uma mistura asfáltica reciclada com teor de 7% do ácido graxo da borra do óleo de soja por peso do ligante asfáltico e realizar uma estimativa de custo de produção dessa mistura comparando com o custo de uma mistura asfáltica tradicionalmente utilizada no Brasil.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Avaliar o comportamento mecânico de uma mistura asfáltica reciclada com 40% de RAP e ligante asfáltico modificado com o ácido graxo da borra do óleo de soja no teor de 7%.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Investigar o desempenho mecânico da mistura asfáltica reciclada com ácido graxo da borra do óleo de soja em comparação com uma mistura asfáltica convencional;
- Realizar uma estimativa de custo de produção da mistura asfáltica reciclada com o ácido graxo da borra do óleo de soja.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Revestimento Asfáltico

No pavimento, o revestimento asfáltico é a camada mais externa, responsável por impermeabilizar, servindo como uma camada protetora para as demais camadas. Recebe os maiores carregamentos, que devido a sua flexibilidade e durabilidade, resiste de forma excepcional os esforços de tração, compressão e fadiga proporcionados pelo tráfego de veículos, atenuando a propagação desses carregamentos sobre as camadas mais internas. Além disso, é responsável por garantir a aderência dos pneus dos veículos, proporcionando segurança ao tráfego (PENZ, 2010).

Os revestimentos asfálticos são constituídos por misturas de agregados graúdos e miúdos com ligantes asfálticos que têm o papel de aglutinar e formar uma camada de revestimento resistente e flexível. Podem ser misturados a quente com a utilização de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) ou a frio com a utilização de Emulsão Asfáltica de Petróleo (EAP).

O ligante asfáltico é oriundo do processo de refino do petróleo, apresenta baixa deformação elásticas quando submetido a diferentes tensões, gerando deformações plásticas devido à sua natureza viscoelásticas (LAGOS-VARAS *et al.*, 2020).

Segundo Bernucci *et al.* (2022), as misturas a quente podem ser divididas conforme sua graduação e suas fabricações consistem na mistura dos agregados miúdos e graúdos com ligante asfáltico a uma temperatura previamente escolhida, em função da característica viscosidade-temperatura do ligante. Entre as misturas mais fabricadas estão:

- Concreto Asfáltico (CA): que apresenta uma curva granulométrica linear e bem-graduada, possuindo em sua estrutura poucos vazios devido aos preenchimentos dos espaços pelos agregados de menores dimensões, e por consequência, alta densidade, propiciando um revestimento resistente e pouco permeável;
- Camada Porosa de Atrito (CPA): esse tipo de mistura apresenta uma granulometria pouco variada, apresentando agregados de aproximadamente mesmo tamanho, gerando assim muito vazios entre as partículas, formando uma estrutura mineral poroso com alta capacidade drenante;
- *Stone Matrix Asphalt* (SMA): este tipo de mistura possui proporcionalmente agregados de maiores dimensões em comparação com os de dimensões intermediárias, além de possuir pequena quantidade de finos, apresentando uma descontinuidade em certos intervalos

granulométricos. O objetivo dessa granulometria é formar um esqueleto mineral mais resistente a deformações permanente, utilizando-se do maior contato entre os agregados graúdos.

As misturas asfálticas usinadas a frio são constituídos de agregados graúdos, miúdos e de enchimento, os quais são misturados a temperatura ambiente com emulsão asfáltica de petróleo, sendo possível realizar mistura em loco, ideal para a realização de pequenas manutenções e utilização em rua e estradas de baixo volume de tráfego. O percentual granulométrico pode ser manipulado para se obter características como alta densidade ou alta porosidade e permeabilidade, tendo assim grande versatilidade de utilização (BERNUCCI *et al.*, 2022).

No Brasil e no mundo, o revestimento asfáltico mais utilizado é o Concreto Asfáltico (CA) que consiste em um ligante betuminoso derivado da destilação do petróleo com propriedades termoviscoplastico, apresenta baixa reatividade e possui características impermeabilizantes. Além disso, tem durabilidade, resistência a ação de ácidos, álcalis e sais, somado a alta capacidade aglutinante dos agregados (ZAGONEL, 2013).

2.2 Defeitos dos Revestimentos Asfálticos

Os pavimentos asfálticos são dimensionados para um período de vida útil, no qual intervenções de reparos deverão ser mínimas, sem apresentar defeitos estruturais que comprometam a segurança e o conforto dos usuários. Para que isso ocorra, é fundamental realizar um estudo de tráfego, a fim de mensurar o grau de exigência das tensões que atuará sobre a camada de rolamento. Dessa forma, os esforços atuantes estarão condizentes com a capacidade estrutural calculada para suportar as tensões.

Segundo Oliveira *et al.* (2019), a intensidade do trânsito e as intempéries climáticas formam os fatores ativos de degradação, e os fatores passivos estão relacionados com a qualidade dos materiais empregados na construção do pavimento e a forma da execução do projeto. Esses fatores atuando em concomitância ou isoladamente acabam dando origem a uma série de patologias que necessitam de intervenções de manutenção para serem sanadas.

O excesso de cargas, o baixo controle tecnológico dos materiais e a falta de fiscalização dos parâmetros de qualidade nas etapas de construção e operação das estradas agravam a ocorrência de danos estruturais ao longo do tempo. Logo, manutenções periódicas nas estradas e rodovias são fundamentais para um estado de conservação satisfatório. A falta de reparos gera o aumento considerável no volume de trincas interconectadas, deformações, sucos, ondulações

e buracos, juntamente com a quantidade de acidentes causados por essas patologias (JACQUES *et al.*, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Os ligantes asfálticos cumprem um importante papel na composição dos pavimentos flexíveis, atuando como agentes aglutinadores das partículas dos agregados e atribuem a importante característica da flexibilidade nas situações de tensões causadas pelas cargas atuantes do trânsito. Todavia, com o passar do tempo, a exposição a agentes ambientais e ao tráfego causa o envelhecimento do ligante, tanto na etapa construtiva do pavimento pelos processos de espalhamento e compactação; como também ao longa vida útil de serviço, devido à ação química do oxigênio, da incidência de radiação UV e das variações de temperatura e umidade (OSMARI; ARAGÃO, 2016).

De acordo com Behnood (2019), o envelhecimento do ligante asfáltico ocorre em duas etapas: a curto prazo, durante a fabricação e espalhamento da mistura, ocasionado pelas altas temperaturas e cargas de compactação presentes no processo de construção do pavimento; e a longo prazo, durante a vida útil do pavimento, devido à ação da oxidação e perda de compostos voláteis da mistura asfáltica.

No processo de envelhecimento, o oxigênio exerce o papel de agente oxidativo, que causa a degradação e evaporação de compostos leves do ligantes asfáltico. Em conjunto com a radiação UV e altas temperaturas, esse processo é intensificado, deixando o revestimento asfáltico duro e quebradiço, tornando-o mais propenso a rachaduras e outros tipos de defeitos (MOHAMMADAFZALI *et al.*, 2017).

Um das patologias mais frequentes em pavimentos flexíveis é o fendilhamento por fadiga. Conforme o revestimento é submetido a ações repetidas dos esforços de tração por flexão, surge microfissuras nas camadas inferiores do pavimento asfáltico que tendem a desenvolverem-se ao longo do tempo com o aumento de seus comprimentos e espessuras até atingir a superfície do pavimento, fragilizando toda a estrutura com a entrada de água por meio dessas fendas. Além do carregamento sucessivo, a diminuição drástica da temperatura ambiente provoca a retração que, por sua vez, pode originar o aparecimento de fissuras (FONTES, 2009).

Outra patologia muito comum são as deformações permanentes, que têm origem a partir do aumento gradual do número de solicitações das cargas de tráfego pesado. Essas deformações possuem caráter residual, pois permanecem no revestimento mesmo após cessar os efeitos da atuação da carga. Surgem com forma de depressões longitudinais nos pontos críticos de rolagem dos pneus dos veículos, acompanhadas de elevações laterais. Com a atuação das tensões, tem-se a diminuição do volume do revestimento asfáltico e, em concomitância, a deformação por cisalhamento desse material (COELHO, 1996).

Pode-se dividir as deformações permanentes em: deformações por consolidação ou densificação, que tem a característica de apresentar depressões da camada de revestimento próximas ao centro de aplicação das tensões, efeito da compactação dessa região; por deformações plásticas ou rodeiras devido a depressões formadas pelas tensões dos pneus, apresentando deformações longitudinais ao longo da banda de rolagem; e deformações estruturais, na qual as deformações não ocorrem apenas na camada de revestimento, podendo atingir as camadas de base, sub-base ou solo de fundação (FONTES, 2009).

Devido ao processo de degradação provocado pelas tensões oriundas do tráfego e potencializada pelo processo de envelhecimento do ligante asfáltico, estimulado pelas ações ambientais como variações de temperatura e exposição a agente oxidantes, é necessário buscar alternativas viáveis para realizar a recuperação e reutilização do revestimento asfáltico degradado, devolvendo-o, em parte ou totalidade, suas propriedades originais de resistência.

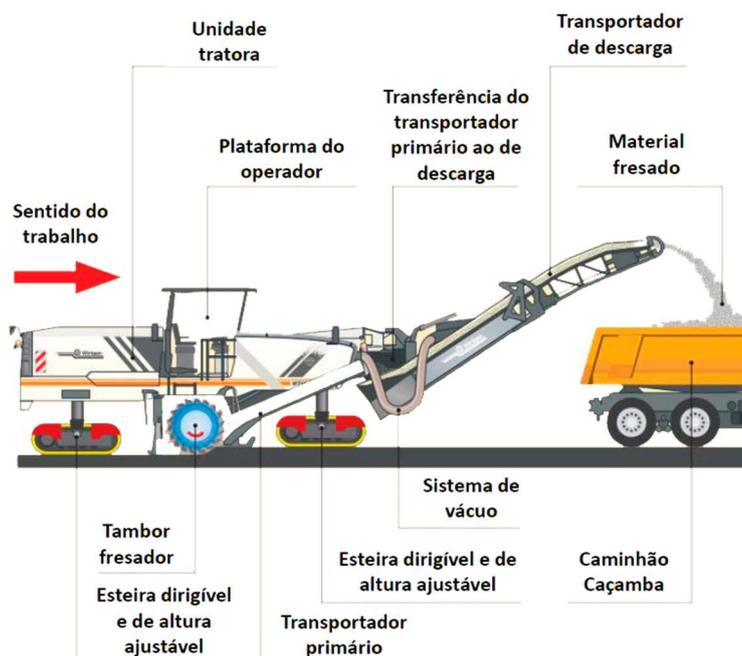
2.3 Misturas Asfálticas Recicladas

O ligante asfáltico, dentre os materiais utilizados na construção de pavimentos, é um dos mais importantes, requerendo das indústrias fabricantes uma alta produção. As matérias-primas de forma geral estão diminuindo a sua disponibilidade gradativamente no mundo, elevando os seus preços (UNGUREANU *et al.*, 2020). Assim, a construção de novos pavimentos utilizando exclusivamente matérias virgens vem tornando-se cada vez menos viável, sendo necessário inovações inerentes à utilização de materiais com menores custos.

A falta de manutenção periódica, ausência de controle técnico de execução dos projetos, baixo controle tecnológico dos materiais, carregamentos excessivos que extrapolam os limites resistentes dos pavimentos, ausência de mecanismos de drenagem e o próprio processo natural de envelhecimento acabam exigindo a realização de procedimentos periódicas de manutenção nos revestimentos asfálticos (Oliveira *et al.*, 2022). Tais processo de reparos geram ao longo do tempo milhares de tonelada de resíduos, que por vezes são despejados de forma inadequada na natureza, produzindo graves impactos ambientais.

No processo de revitalização do pavimento asfáltico está incluído a etapa de fresagem, que consiste no corte de uma ou mais camadas do pavimento asfáltico que está deteriorado em um processo mecanizado a frio. Para isso, é utilizado um equipamento especial denominado máquina fresadora, dotada de sistema autopropulsionado, cilindro fresador contendo dentes de corte forjados em aço e esteira que permite a elevação do material fresado para depositá-lo em um caminhão, como mostra a Figura 1. (DNIT 159/2011-ES).

Figura 1: Equipamentos para fresar revestimentos asfálticos



Fonte: Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) (2018)

Esse processo tem como produto o RAP, que consiste em um material moído composto por agregados cobertos e unidos por ligantes asfáltico envelhecido (SILVA; FARIAS, 2018). Apresenta propriedades mecânicas satisfatórias, servindo de substituto de materiais virgem na produção de novos revestimentos asfálticos. Suas propriedades dependem da granulometria da mistura asfáltica que foi submetido ao processo de fresagem, do estado de deterioração do revestimento, da temperatura ambiente, do tipo de fresadora, da velocidade de operação do equipamento e profundidade de corte (Agência Nacional de Transporte Terrestres – ANTT, 2018).

Segundo Bonfim (2010), a fresagem pode ser dividida em três tipos de acordo com a profundidade do corte:

- (1) Fresagem superficial: é mais frequentemente utilizada para regular ou melhorar a aderência da superfície de rolamento do revestimento asfáltico. Porém a textura obtida mostra-se desconfortável para os usuários da via.
- (2) Fresagem rasa: esse tipo de fresagem é utilizado mais comumente para correções de defeitos funcionais e para realização de remendos superficiais, nas quais a profundidade de corte não ultrapassa 5 cm, restringindo-se as camadas superiores do revestimento, podendo chegar na camada de ligação dependendo da situação.

(3) Fresagem profunda: nesta modalidade, a fresagem pode atingir as camadas mais inferiores do pavimento, como a base e sub-base. É utilizado quando se manifestam patologias que atingem as camadas estruturais do pavimento, sendo necessário reorganizar a configuração da estrutural ou adição de matérias do revestimento à base.

Segundo Araújo (2004), a técnica da fresagem/reciclagem pode ser justificada devido a alguns pontos importantes como: a facilidade na remoção das camadas de revestimento que porventura estejam com deformações plásticas (longitudinais e transversais) ou que estejam com fissuração; a camada de revestimento adquire uma superfície altamente aderente para o novo revestimento devido às ranhuras causadas pelos dentes do tambor fresador; O processo é mecanizado e é realizado de forma rápida e com uma pequena quantidade de mão de obra, com uma grande vantagem ecológica e econômica, pois o RAP é produzido a partir do processo de fresagem e pode ser utilizado na produção de novos revestimentos asfálticos. Assim, essa atividade, permite uma destinação final para o material que seria, provavelmente, depositado em local impróprio, diminuindo por consequência a exploração de matérias-primas virgens na natureza e os custos de produção de revestimento, já que se trata de um material reciclado praticamente sem custo de produção.

Diante da preocupação com a degradação do meio ambiente e, paralelo a isso, a crescente dos custos de produção, o RAP tornou-se uma alternativa para contornar esses problemas. A busca por materiais de pavimentação alternativos, economicamente sustentáveis, tem sido altamente relevante, tornando o revestimento asfáltico reciclado um novo material para ser utilizado na pavimentação (OLIVEIRA *et al.*, 2022). Diversas pesquisas indicam que misturas asfálticas produzidas com a incorporação de material asfáltico reciclado apresentam desempenho estrutural igual ou superior a misturas convencionais produzidas com materiais virgens (ABDEL-JABER *et al.*, 2022).

Todavia, a incorporação de alto teores de RAP às misturas asfálticas podem ocasionar o aumento da rigidez, deixando-as mais suscetíveis ao surgimento de trincas por fadiga, tendo em vista que o ligante asfáltico presente no RAP passou pelo processo de envelhecimento e está no fim de sua vida útil (ZHAO *et al.*, 2013). Assim, a adição de agentes rejuvenescedores é fundamento para devolver ao ligante asfáltico as antigas propriedades perdidas no tempo, melhorando as suas capacidades de resistência às tensões de deformação do tráfego.

2.4 Agentes Rejuvenescedores

A viabilidade da utilização de RAP é possibilitada devido à ação de agentes rejuvenescedores que são adicionados à mistura, atuando como um agente químico que recupera as propriedades reológicas dos ligantes envelhecidos e manter as propriedades de serviços (XINXIN, 2018). O ligante envelhecido sobre ação química tem a diminuição da viscosidade, repondo as resinas e óleos aromáticos perdidos no processo de envelhecimentos do asfalto (ARAÚJO, 2004).

Segundo Behnood (2019), os agentes rejuvenescedores são aditivos cuja composição apresenta componentes de baixo peso molecular, podendo ser melhorado com adição de ligante asfáltico natural, melhorando assim suas propriedades reológicas e de engenharia. O autor ainda confirma a importância da utilização de ligantes rejuvenescidos do ponto de vista da redução das emissões de gases de efeito estufa; redução da exploração dos recursos naturais não renováveis, prolongando o tempo de extração de matérias primas das jazidas; e redução da degradação do meio ambiente devido à deposição inapropriada de resíduos oriundos da pavimentação.

A dosagem do rejuvenescedor deve produzir uma mistura estável, que apresente flexibilidade e rigidez moderada. O excesso do agente modificador pode acarretar uma mistura muito flexível, fragilizando a resistência a deformações permanente. Por outro lado, a baixa dosagem pode fragilizar a resistência a fissuras por fadiga, deixando o revestimento muito rígido para resistir às tensões de tráfego. Dessa forma, o percentual ideal do agente rejuvenescedor na mistura deve ser analisado de acordo com o grau de envelhecimento apresentado pelo RAP (MELO NETO, 2022).

De acordo com Torres (2020), os agentes rejuvenescedores são divididos em cinco grupos: os óleos parafínicos, oriundos do refino de óleos lubrificantes usados; os óleos aromáticos, produtos derivados do refino do petróleo cuja composição contém compostos polares aromáticos; os óleos naftênicos que são hidrocarbonetos com capacidade de modificar ligantes asfálticos; os triglicerídeos e ácidos graxo que são derivados de óleos de origem vegetal; e o óleo de pinho, subproduto da indústria de papel.

Atualmente, os principais rejuvenescedores disponíveis no mercado são a base de xisto e a base de alcatrão (ambos de origem fóssil). O primeiro óleo rejuvenescedor, óleo de xisto, é dividida em duas categorias: a quente, “Aditivos Asfálticos de Reciclagem de Mistura a Quente” (AR); e a frio, “Agentes de Reciclagem Emulsionados” (ARE). Os agentes rejuvenescedores (ARs) possuem compostos aromáticos em sua composição, agentes

importantes para reconstituir a ductilidade e consistência original do ligante asfáltico e são utilizados em processo de reciclagem a quente. A regulamentação técnica DNC nº 04/97 – Portaria nº 44 de 29/09/1997 especifica os seguintes agentes rejuvenescedores a quente: AR-1, AR-5, AR-25, AR-75, AR-250, AR-500, variando suas concentrações de óleo de xisto e consistência em ordem crescente. A escolha do AR vai depender do estado de envelhecimento do ligante asfáltico, quanto mais envelhecido, menos consistente deverá ser o agente para que as propriedades reológicas sejam recuperadas, e vice-versa. Os AREs são utilizados em processos de reciclagem a frio, e assim como os ARs, possuem capacidade de recuperar a ductilidade e consistência original dos ligantes asfálticos. Existem seis tipos, ARE-1, ARE-5, ARE-25, ARE-75, ARE-250 e ARE-500, assim como é feita para os agentes rejuvenescedores a quente, a escolha do tipo é baseada no grau de envelhecimento do material reciclado (SILVA, 2011).

O agente rejuvenescedor a base de alcatrão disponível no mercado brasileiro, conhecido comercialmente pelo nome RejuvaSeal®, foi desenvolvido pela empresa americana *Pavemet Rejuvenation International (PRI)* e é comercializado no Brasil pela empresa SPM. Este produto é utilizado em diversos outros países na preservação de estradas, pistas de aeroportos, pátios e portos devido a sua capacidade de restaurar e proteger o pavimento asfáltico envelhecido (SILVA; FARIAS, 2020; TORRES, 2020). Seu desenvolvimento decorreu-se na década de 1970, com apresentação de um relatório – Rejuvenescimento de pavimento asfáltico – que mostrou as melhoras consideráveis nas propriedades dos ligantes asfálticos analisados (FWA, 2006).

Segundo Mah (2008), o rejuvenescedor a base de alcatrão é composto de 35% a 50% de alcatrão, 32% a 42% de destilado de petróleo de 15% a 40% de rejuvenescedor. O mesmo autor apresentou os benefícios da utilização do RejuvaSeal®, como a impermeabilização da superfície do revestimento, aumentando a resistência a ações deletéria da água e dos combustíveis, diminuindo assim o índice de envelhecimento do ligante asfáltico devido à selagem e defesa da superfície. Ainda relatou a melhora na viscosidade e ductilidade do ligante presente nos revestimentos analisados.

Diante do esgotamento dos recursos não renováveis, da degradação do meio ambiente e da escalada dos preços dos derivados do petróleo, o bio-óleo vem tornando-se uma alternativa viável para ser utilizado como agente rejuvenescedor em misturas asfálticas contendo RAP, tendo em vista suas vantagens econômicas e químicas no que tange a recuperação dos ligantes envelhecidos, diminuindo consideravelmente a rigidez e contribuindo no desempenho em baixas temperaturas (ZHANG *et al.*, 2018; SANTOS; FAXINA, 2019).

Zhang (2018), em seu trabalho, analisou a utilização de bio-óleo derivado de resíduos de madeira como agente rejuvenescedor de ligante asfáltico em percentual de 10%, 15% e 20% em peso da mistura com ligante envelhecido. Constatou-se com o teste do *Gas Chromatograph Mass Spectrometer* (GC-MS) que este bio-óleo possui em sua composição altos teores de compostos leves como fenol, naftaleno e ftalato de dietila que são muito importantes para regenerar as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos. No estudo as propriedades das misturas com o agente rejuvenescedor foram comparadas com outra mistura composta exclusivamente com materiais virgens (PG 58-28), os resultados apontam bom desempenho das misturas recicladas, especialmente da mistura com 15% em peso desse agente rejuvenescedor, com a resistência à fissuração a baixa temperatura chegando a patamares semelhantes a resistência do asfalto virgem.

Torres *et al.* (2020) analisou o comportamento mecânico de misturas asfálticas com RAP em sua composição, nos teores de 0%, 30% e 60%, e óleo residual de origem vegetal, nos teores de 0%, 2% e 4%. No estudo foram analisadas diversas combinações de teores de RAP e de óleo residual. Um planejamento fatorial foi realizado e determinada a quantidade de ensaios e combinações de teores do óleo e RAP, com a finalidade chegar a melhor combinação possível entre materiais utilizados, tanto no que tange a resistência a deformações permanentes e resistência à tração, como também no ponto de vista de economia de agregados e ligantes asfáltico (CAP 50/70). Os resultados indicaram que o aumento do teor do AR diminuiu a resistência a deformações permanentes à medida que a resistência a fissuras por fadiga aumentava. Além disso, observou-se que, para as misturas com 60% de material fresado, houve uma redução de 80% de brita 12,5 mm e uma redução de 1,2% de ligante asfáltico novo, bons indicativos da capacidade de economia proporcionado pela utilização de RAP em conjunto com agentes regeneradores de ligantes asfálticos. Por fim, o autor conclui que a utilização de materiais reciclados é viável do ponto de vista técnico e ambiental, com melhora da trabalhabilidade das misturas recicladas devido ao incremento do agente rejuvenescedor de origem vegetal à mistura. O estudo indica a composição de 2% de óleo vegetal residual e 30% de RAP, sendo essa a proporção ideal para os materiais estudados, sendo essa a melhor relação custo-benefício.

O estudo desenvolvido por Melo Neto (2022) estudou as propriedades rejuvenescedoras do ácido graxo da borra do óleo de soja (AGBS), agente de origem vegetal, em misturas asfálticas recicladas com 40% de RAP, nos teores de 0%, 3% e 5% do ácido no ácido ligante asfáltico. Além disso, avaliou a viabilidade técnica, econômica e ambiental de misturas asfálticas recicladas modificadas por ligantes asfálticos com o ácido graxo da borra do

óleo de soja (AGBS). Os estudos apontaram uma melhora a resistências a deformações permanente com a adição de RAP à mistura, efeito causado pelo aumento da rigidez, porém houve piora em relação à resistência à fadiga, condição essa melhorada com o aumento do teor do agente rejuvenescedor na mistura, refletindo diretamente na diminuição da viscosidade do ligante asfáltico. A mistura RAP40%+5%AGBS apresentou o melhor desempenho mecânico a deformações permanente e a fadiga, apresentando valores de fator de utilidade superiores à mistura de referência.

De forma geral, pode-se concluir que a utilização de agentes rejuvenescedores de origem vegetal é uma ótima alternativa aos agentes de origem fóssil, minimizando os impactos ambientais com a exploração de recursos renováveis que são, por natureza, menos agressivas ao meio ambiente e minimizando custos atrelados à construção de pavimentos com utilização de materiais reciclados.

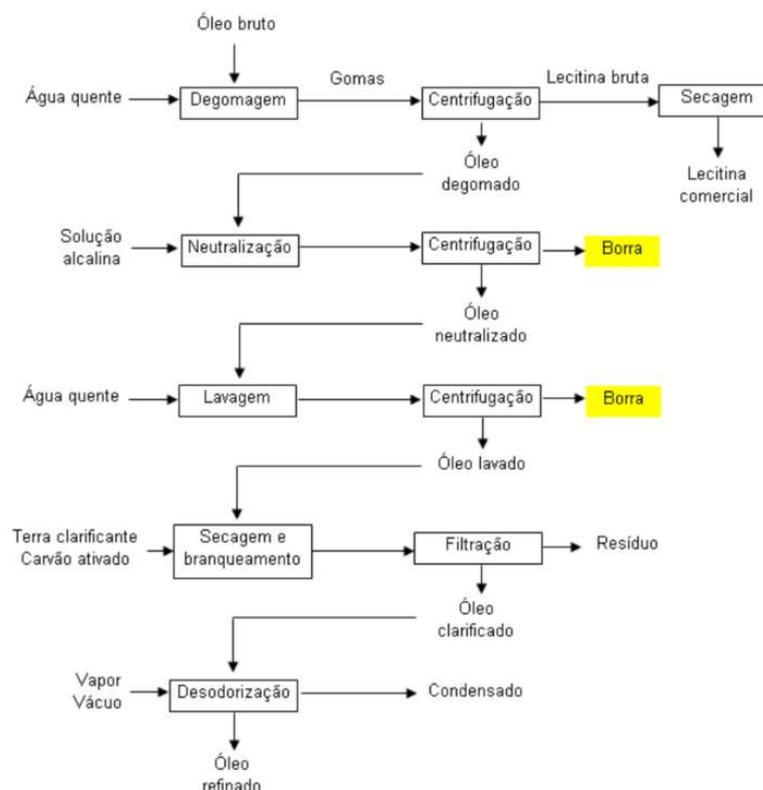
2.5 Borra do Óleo de Soja e Ácido Graxo da Borra do Óleo de Soja

A soja é uma das plantas mais cultivadas do mundo, sendo de grande importância para a segurança alimentar da humanidade por grande parte da história humana. Pertence à família *Leguminosae* e ao gênero *Glycine*, conhecida comercialmente pelo nome *Glycine max*. A partir do grão da soja são extraídos óleos que podem ter os mais variados fins, como óleo de cozinha, glicerina, sabões e até mesmo combustíveis (CARUSO, 1998).

Segundo Da Fré (2009), o óleo de soja é dividido quanto ao seu grau de elaboração e sua qualidade. No grau de elaboração, sendo possível dividi-la em bruto ou cru (óleo extraído do grão), degomado ou purificado (óleo obtido após a extração dos fosfolipídios do óleo bruto) e o refinado que se trata do produto das etapas anteriores mais o processo de refino, tendo sido neutralizado, clarificado e desodorizado.

A borra de soja é o sabão formado durante o processo de neutralização do refino químico do óleo bruto, devido à remoção de ácidos graxos livres com hidróxido de sódio. O sabão e demais materiais não oleosos são removidos do óleo por meio da centrifugação, dando origem à borra (DOWN, 1998). Este subproduto possui em sua composição: água, sais de sódio de ácido graxos, triglicerídeos, fosfolipídios, matéria insaponificável e produtos de degradação (MAG *et al.*, 1983).

De acordo com DA FRÉ (2009), as principais etapas de refino do óleo de soja bruto são: degomagem (hidratação), neutralização (desacidificação), branqueamento (clarificação) e desodorização. A Figura 2 mostra o processo esquematizado.

Figura 2: Fluxograma do processo de refino dos óleos e gorduras

Fonte: DA FRÉ (2009)

Os ácidos graxos da borra do óleo de soja são obtidos a partir da acidulação da borra resultante do processo de refino do óleo de soja. A acidulação consiste em uma série de processos que visam a separação das partículas minerais dos demais componentes que não tem valor para a indústria. Esses ácidos graxos destilados podem ser utilizados para diversas finalidades, como a produção de alimentos, tintas, vernizes, fertilizantes, agroquímicos, plásticos, borrachas, resina, surfactantes, ésteres, lubrificantes, cosméticos, biocombustíveis e agentes rejuvenescedores de asfalto (MELO NETO ,2022; ARAÚJO *et al.*, 2016).

2.6 Custo de Produção de Misturas Asfálticas

Devido à escalada dos preços dos insumos utilizados na indústria da pavimentação, o entendimento da composição de custos da produção de misturas asfálticas tornou-se fundamental para desenvolver estratégias eficientes para reduzir custos de produção. O mundo vive um período em que matérias-primas derivadas do petróleo estão altamente valorizadas, o que acaba encarecendo a produção de misturas asfálticas convencionais, sendo necessário buscar alternativas viáveis economicamente.

Os principais materiais utilizados na produção do revestimento asfáltico convencional são: areia média, pó de pedra, brita n. 0, brita n. 1 e cimento asfáltico de petróleo (CAP). Os preços de mercado desses materiais por unidade de medida são disponibilizados mensalmente por região no Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI). O Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) pode servir de banco de dados para consulta de preços dos materiais (PEREIRA, 2020).

Para o cálculo do preço da tonelada do revestimento asfáltico é necessário o percentual de cada componente da mistura, assim como o peso específico de cada material. Assim, pode-se determinar a quantidade e o valor dos materiais necessários para a fabricação de uma tonelada da mistura asfáltica.

O custo residual decorrente do transporte dos materiais deve ser levado em consideração nos cálculos, pois, a depender da localização da usina de fabricação da mistura, pode refletir significativamente no custo final de produção. Para fins de cálculo, o SINAPI disponibiliza o custo de transporte do metro cúbico de materiais por quilômetros rodados com caminhão basculante, bastando multiplicar a distância média da usina à jazida pela quantidade em metros cúbicos do material que será utilizado.

2.7 Ponderações

De acordo com o exposto neste trabalho, a utilização do resíduo gerando nos processos de fresagem (RAP) no revestimento asfáltico mostrou-se uma excelente alternativa aos materiais virgens. Essa viabilidade é dividida às propriedades de resistência, que em análises comparativa entre misturas recicladas e misturas convencionais apresentaram desempenho semelhante ou superior (MELO NETO, 2022; TORRES *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2018).

Todavia, a adição do material reciclado à mistura provoca o aumento da rigidez devido ao envelhecimento do ligante asfáltico, deixando mais suscetível ao aparecimento de fissuras

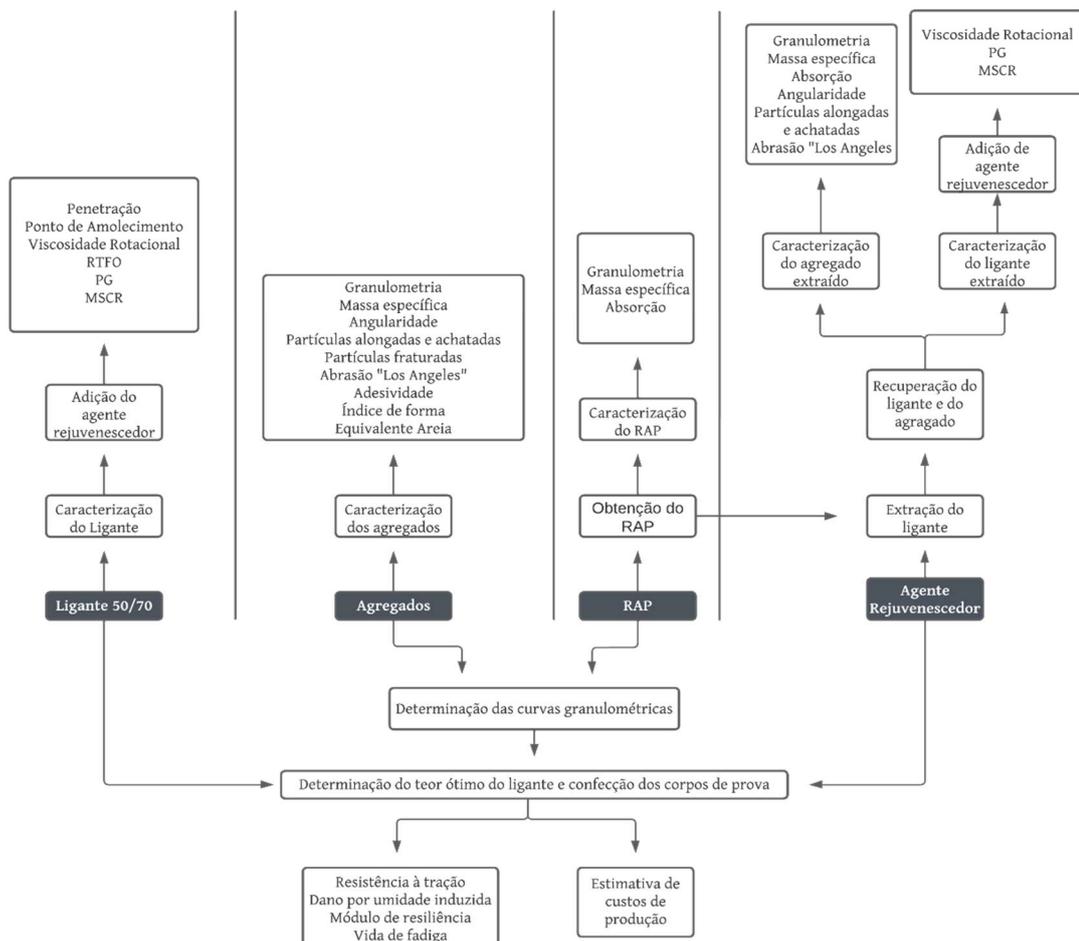
no revestimento asfáltico ao longo do tempo. Dessa forma, a utilização de agentes rejuvenescedores é essencial para viabilizar a reciclagem do RAP.

A borra do óleo de soja, um subproduto gerado no processo de refinamento do óleo de soja, tem baixo custo e é fonte para a extração de ácidos graxos importantes para a produção de agentes rejuvenescedores. Por ser de origem vegetal, o AR produzido a partir desse material é ecologicamente sustentável e renovável, podendo substituir os que são mais danosos ao meio ambiente por serem derivados de petróleo, emissores de gases poluentes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo contém a descrição dos materiais utilizados para a produção das misturas asfálticas, assim como os métodos e procedimentos usados para avaliar o desempenho físico-reológico do ligante asfáltico virgem e o recuperado pela ação agente rejuvenescedor derivado do óleo de soja. A Figura 3 apresenta o fluxograma realizado nas etapas da pesquisa.

Figura 3: Fluxograma geral do programa experimental



Fonte: Autor (2022)

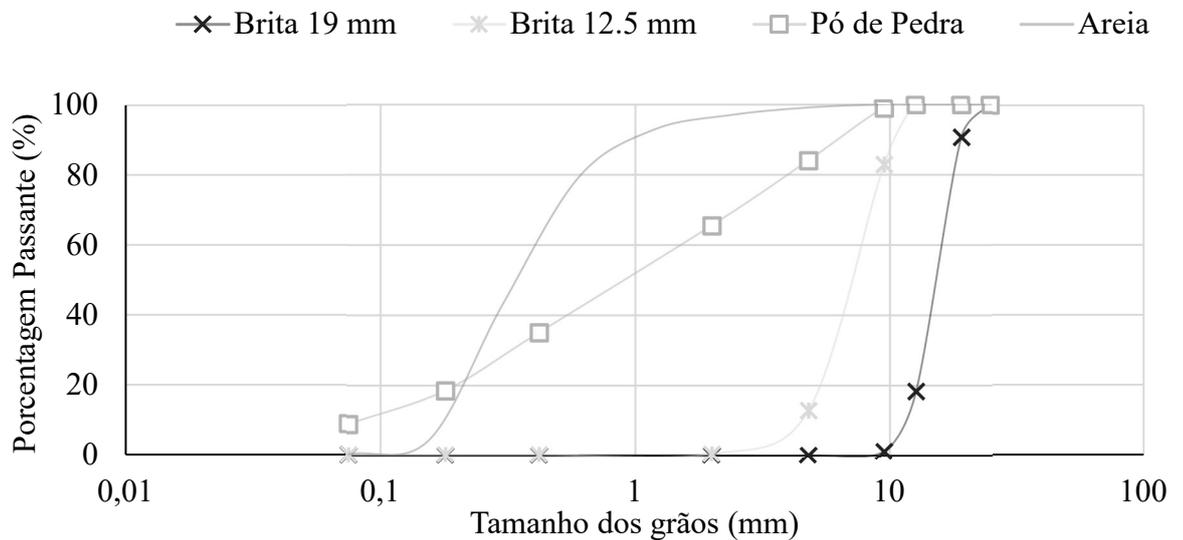
3.1 Materiais

3.1.1 Agregados Naturais

Para a fabricação das misturas asfálticas foram utilizados agregados graúdos do tipo brita granítica de diâmetro nominal máximo de 19 mm e 12,5 mm. Pó de pedra de origem granítica e areia compõem os agregados finos utilizados neste estudo. Utilizou-se Cal hidratada dolomítica (CH-I) como filer.

Para a caracterização dos agregados naturais foi realizado pelos procedimentos de massa específica, índice de forma, equivalente areia, absorção, abrasão Los Angeles, análise granulométrica, partículas alongadas e achatadas, adesividade de agregado, angularidade e partículas fraturadas. A análise dos resultados da granulometria mostrou que os agregados graúdos e a areia possuem graduação uniforme, e o pó de pedra possui graduação densa. Os resultados estão disponíveis na Figura 4 e Tabela 1. Os dados obtidos na Tabela 1 se encontram dentro das especificações das normas, viabilizando o uso desses materiais com agregados para a mistura asfáltica a quente.

Figura 4: Curva granulométrica dos agregados naturais



Fonte: Autor (2022)

Tabela 1: Caracterização dos agregados naturais obtidos

Ensaio	Norma	Especificação	Resultados			
			Brita 19 mm	Brita 12.5 mm	Pó de pedra	Areia
Massa específica real (g/cm ³)		-	2,759	2,625	2,542	2,665
Massa específica aparente (g/cm ³)	(ASTM C127 2016)	-	2,732	2,612	2,430	2,607
Absorção (%)		≤2	0,36	0,52	0,66	0,84
Índice de Forma	(ASTM D4791 2019)	≥0,5	0,678	0,665	-	-
Equivalente Areia (%)	(ASTM D2419 2014)	≥55	-	-	73,53	76,26
Abrasão “Los Angeles” (%)	(ASTM C131 2020)	≤55	20,22	21,66	-	-
Partículas alongadas e achatadas (%)	(ASTM D4791 2019)	≤10	8,44	8,74	-	-
Partículas fraturadas (%)	(ASTM D5821 2017)	≥90	99,78	99,81	-	-
Angularidade (%)	(ASTM C1252 2017)	≥45	-	-	45,04	55,35

Fonte: Autor (2022)

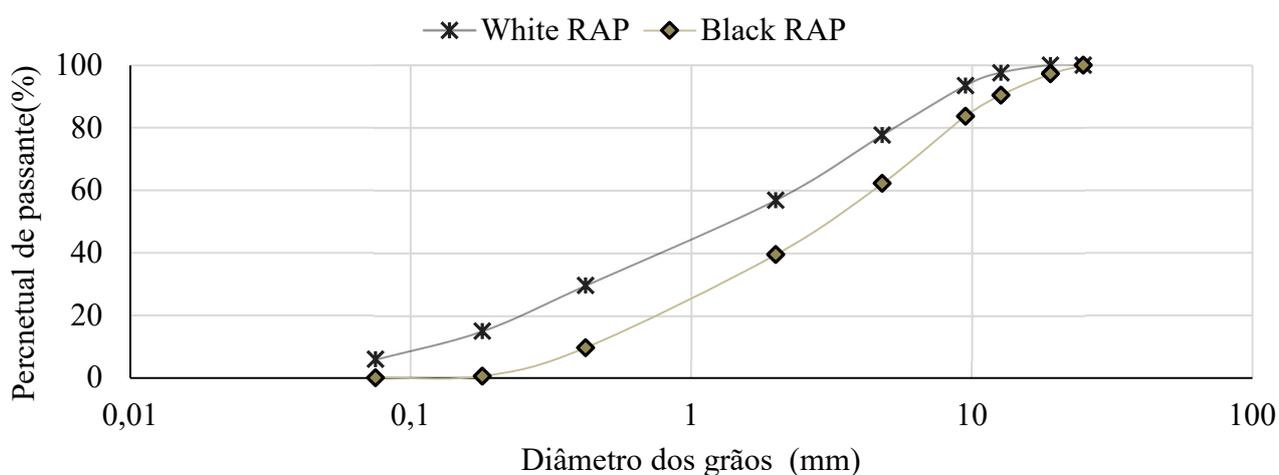
3.1.2 RAP

A amostra de RAP utilizada neste trabalho foi oriunda da BR230 do Km 15. Para a caracterização, utilizou-se os mesmos ensaios comumente realizados para agregados naturais, empregando-os no White RAP (RAP sem o ligante envelhecido aderido aos agregados) e no Black RAP (RAP com ligante envelhecido aderido aos agregados). A Tabela 2 apresenta os resultados da caracterização e a Figura 5 a curva granulométrica dos agregados do RAP. Os dados demonstrados na Tabela 2 e Figura 5 encontram condizentes com as normas, viabilizando o uso desses materiais para a produção de misturas asfálticas.

Tabela 2: Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados do RAP

Teste	Norma	Especificação	Resultados	
			Black RAP	White RAP
Massa específica real (g/cm ³)	(ASTM C127 2016)	-	2,464	2,466
Massa específica aparente (g/cm ³)	(ASTM C127 2016)	-	2,374	2,378
Absorção (%)	(ASTM C127 2016)	≤2	0,50	0,89
Equivalente Areia (%)	(ASTM D2419 2014)	≥55	86,59	68,56
Partículas alongadas e achatadas (%)	(ASTM D4791 2019)	≤10	-	9,34
Angularidade (%)	(ASTM C1252 2017)	≥45	52,62	45,43

Fonte: Autor (2022)

Figura 5: Curvas granulométricas dos agregados RAP

Fonte: Autor (2022)

Após a extração, o ligante asfáltico envelhecido aderido aos agregados do RAP foi submetido a caracterização física e reológica. Seguiu-se a norma (ASTM D2172 2017) para realizar a extração do ligante com o modelo de centrífuga elétrica (Rotarex) e utilizando como solvente o tricloroetileno (ASTM D2172 2017; DNIT 158 2011). A extração seguiu a metodologia presente no trabalho de Melo Neto *et al.* (2022), no qual a amostra é submetida ao aquecimento em estufa durante 1 hora a temperatura de 110°C. Sendo em seguida, destorroadas as amostras e pesadas no prato da centrífuga. Após isso, adiciona-se solvente ao material para posteriormente iniciar a centrifugação em equipamento específico. Com a centrifugação total

do solvente adicionado previamente, foram adicionadas doses de 200ml do diluente até que o solvente saísse claro (mínima concentração de ligante). Ao fim do processo, o ligante asfáltico presente no RAP correspondeu a 5.49%, resultado da média das três amostras ensaiadas.

Após a extração o ligante asfáltico envelhecido foi recuperado com o evaporador rotativo durante 2 horas a uma temperatura de 60°C com vácuo de 0.035 mmHg. O próximo passo foi submeter o ligante a estufa a uma temperatura de 70°C por 6 horas, em seguida por mais 2 horas a uma temperatura de 85°C e mais 2 horas na estufa, dessa vez a uma temperatura de 100°C. Esse processo teve como finalidade realizar a evaporação do solvente utilizado na extração do ligante do RAP, e como o ligante tornava-se mais viscoso ao decorrer do processo, foi necessário submeter a amostra a diferentes temperaturas até que o solvente evaporasse por completo.

O ligante foi caracterizado por meio dos ensaios do ponto de amolecimento, penetração, viscosidade rotacional, *multiple stress creep recovery* (MSCR) e performance grade (PG). A Tabela 3 mostra os resultados do ligante asfáltico envelhecido.

Tabela 3: Caracterização físico e reológica do ligante asfáltico envelhecido do RAP

Testes	Norma	Resultados
Penetração 0,1 mm (100g, 5s a 25°C)	(ASTM D5/D5M 2020)	29
Ponto de Amolecimento (°C)	(ASTM D36 2020)	68
	135 °C	16476
	142 °C	9520
Viscosidade Rotacional (cP)	150°C (ASTM D4402 2015)	6676
	165 °C	2483
	177 °C	1215
Temperatura mais alta do PG (°C)	(ASTM D6373 2021)	82
Jnr 0,1 (kPa ⁻¹)		1,82
Jnr 3,2 (kPa ⁻¹)		2,30
Jnr diff (%)	(ASTM D7405 2020)	26,57
Recuperação média a 0,1 kPa (%)		7,03
Recuperação média a 3,2 kPa (%)		2,50

Fonte: Autor (2022)

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física empírica e reológica permitiu verificar a elevada rigidez apresentada pelo RAP. A baixa penetração e elevada temperatura de ponto de amolecimento demonstraram a alta dureza do material e a viscosidade rotacional, PG e MSCR a alta rigidez. Sendo assim, faz-se necessário a adição de um modificador redutor de viscosidade (agente rejuvenescedor).

3.1.3 Ligante Asfáltico Virgem

Para fins de comparação, foi produzido uma mistura asfáltica compostas exclusivamente com materiais virgens, incluindo o ligante asfáltico PG 64–XX com classificação de penetração 50/70, o tipo mais comumente utilizado no Nordeste. Além disso, o ligante foi utilizado nas misturas asfálticas recicladas após a adição do ácido graxo da borra do óleo de soja. Para a caracterização do ligante virgem e envelhecido pelo processo de envelhecimento a curto prazo com a estufa de filme fino rotativa (*Rollinf Thin Oven Teste*) foram utilizados os seguintes ensaios: penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, performance grade (PG) e MSCR. A Tabela 4 mostra os resultados dos ensaios.

Tabela 4: Caracterização do ligante asfáltico virgem

		Norma	Resultados
Penetração 0.1 mm (100g, 5s a 25°C)		(ASTM D5/D5M 2020)	58
Ponto de Amolecimento (°C)		(ASTM D36 2020)	52
Viscosidade Rotacional (cP)	135°C	(ASTM D4402 2015)	401
	150°C		198
	177°C		72,75
Temperatura máxima de PG (°C)		(ASTM D6373 2021)	64
RTFO		(ASTM D2872 2019)	
Viscosidade Rotacional (cP)	135°C	(ASTM D4402 2015)	557,50
	150°C		269
	177°C		94
Temperatura máxima de PG (°C)		(ASTM D6373 2021)	64
	Jnr a 0.1 Kpa		3,4
	Jnr a 3.2 Kpa		3,83
MSCR	Percentual de recuperação a 0,1 KPa	(ASTM D7405 2020)	5,03
	Percentual de recuperação a 3,2 KPa		0,37

Fonte: Autor (2022)

O ligante asfáltico virgem foi modificado com o teor de 7% do ácido da borra do óleo de sola, a fim de investigar a performance grade (PG) do ligante asfáltico modificado e preencher a lacuna deixada por Melo Neto (2022), no que se refere à investigação dos efeitos do uso de maior teor de ácido graxo da borra do óleo de soja (AGBS) no desenvolvimento mecânico de misturas asfálticas recicladas. A modificação com esse teor acima do estudado por Melo Neto (2022) foi para investigar se esse teor proporciona um maior uso do RAP para

misturas asfálticas recicladas ou um ganho de desempenho mecânico de misturas com 40% de RAP.

3.1.4 Ácido Graxo da Borra do Óleo de Soja

O agente rejuvenescedor do ligantes asfáltico utilizado no trabalho foi o ácido graxo da borra do óleo de soja, produto do processo de acidulação da borra do óleo de soja. A borra foi adquirida da empresa IMCOPA, situada no estado do Paraná. Realizou-se a caracterização do material em laboratório conforme as normas AOCS (*American Oil Chemists' Society*). Tabela 5 mostra os resultados da caracterização.

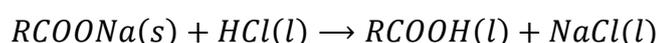
Tabela 5: Caracterização da borra do óleo de soja

Ensaio	Norma	Resultados
Ácido graxo livres em ácido oleico (%)	(AOCS Ca 5a-40 2017)	0,68
Teor de ácido graxo totais (%)	(AOCS G 3-53 2017)	41,59
Teor de ácido graxos oxidados (%)	(AOCS G 3-53 2017)	1,22
Teor de matéria insaponificável (%)	(AOCS Ca 6a-40 2017)	0,87
Teor de óleo neutro (%)	(AOCS G5-40 2017)	12,44
pH a 25°C	(AOCS G7-56 2017)	9,96
Teor de umidade e voláteis (%)	(AOCS Ca 2c-25 2017)	41,85

Fonte: Autor (2022)

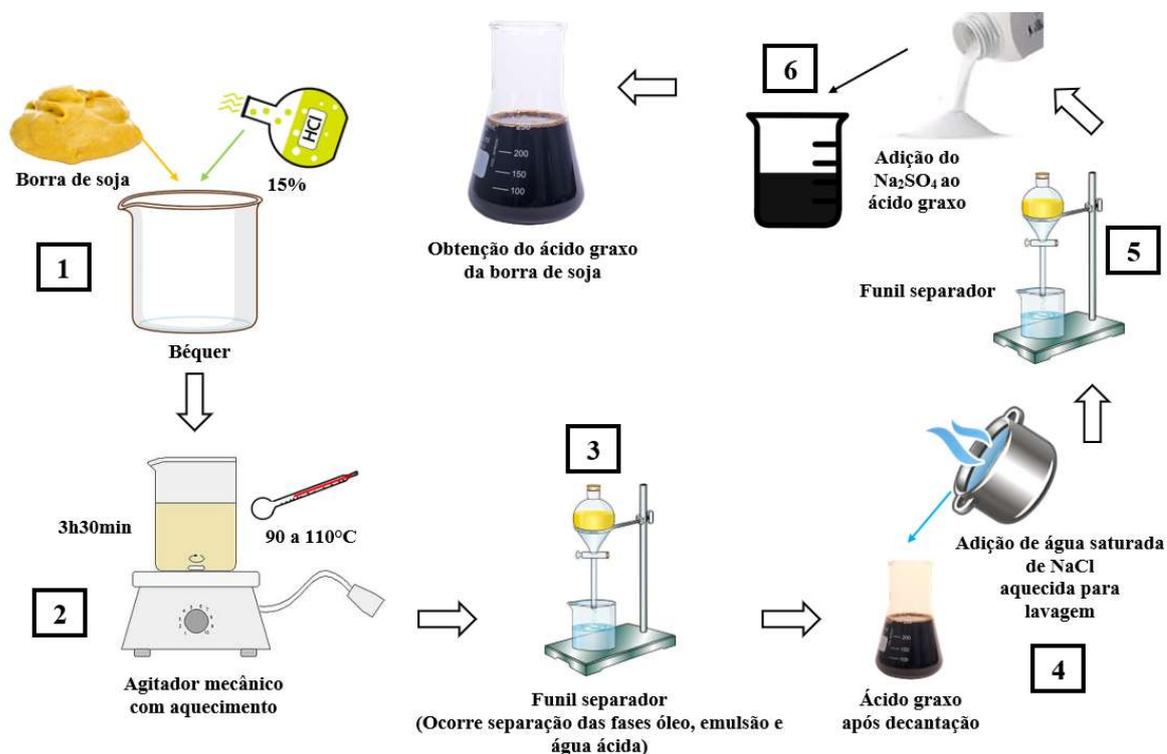
O resultado do teor de ácido graxo totais mostra-se condizente com a estimativa de Swern (1982), entre 35% e 50%, sendo o percentual obtido de 41,59%. Outro dado importante é o teor de umidade e voláteis presente na borra, pois pode influenciar negativamente nos resultados do ligante asfáltico após a modificação, que no caso o ensaio mostrou um alto percentual de umidade e voláteis com 41,85%.

O método utilizado para a realização da acidulação da borra foi o mesmo presente no trabalho de Melo Neto *et al.* (2022). Inicialmente, misturou-se 200 gramas de borra, 48 mL de ácido clorídrico (HCl), 245 mL de água (H₂O) e 4 gotas de alaranjado de metila. Durante 3h30min a mistura foi aquecida com temperaturas entre 90°C a 110°C em um agitador magnético. A reação química provocou a conversão dos sabões em ácido graxos, de acordo a seguinte reação:



Após o fim da reação, é realizado a decantação, obtendo uma mistura heterogênea com três fases visíveis: água ácida (camada inferior), emulsão oleosa (camada intermediária) e ácido graxo (camada superior). A fase da água é descartada e a fase óleo é adicionada água saturada com cloreto de sódio com percentual de 25% a 50%, sendo aquecida e decantada novamente, obtendo assim o ácido graxo da borra do óleo de soja. A Figura 6 ilustra o processo de acidulação utilizado e a Figura 6 mostra o ácido graxo da borra do óleo de soja obtido.

Figura 6: Etapas do processo de acidulação da borra do óleo de soja



Fonte: Autor (2022)

Após a obtenção do ácido graxo da borra do óleo de soja (Figura 7), o aditivo foi caracterizado e os ensaios apontaram um teor de umidade de 2,44% e um teor de ácidos graxos totais de 90%. Estes valores estão condizentes com a estimativa de 85% a 95% de ácidos graxos totais apresentada por Swern (1982), e com os resultados do teor de ácidos graxos totais e do teor de umidade obtidos no trabalho de Melo Neto *et al.* (2022), respectivamente, 91% e 2,26%.

Figura 7: Ácido graxo da borra do óleo de soja



Fonte: Autor (2022)

3.2 Métodos Experimentais

3.2.1 Modificação do Ligante Asfáltico

A modificação do ligante asfáltico (CAP 50/70) teve como objetivo investigar o comportamento reológico do ligante. Para isso, foi realizada a mistura do ligante ao ácido graxo da borra do óleo de soja no teor de 7% por peso do ligante com auxílio do agitador mecânico FISATOM 722D. As etapas da modificação foram as seguintes:

- (1) O ligante foi previamente aquecido em estufa durante 90 minutos a uma temperatura de 135°C, essa etapa tem como objetivo diminuir a viscosidade, facilitando a mistura de forma homogênea.
- (2) Em seguida o material foi depositado em um béquer e posto para a realização da mistura no agitador mecânico a uma rotação de 600 rpm.
- (3) Quando o material atingiu a temperatura de estabilização (140°C), foi adicionado o aditivo, na proporção por peso do ligante puro, e a rotação foi aumentada para 1000 rpm, deixando a mistura acontecer por 30 minutos.

A modificação do ligante asfáltico foi realizada com 7% de ácido da borra do óleo de soja com o objetivo de ampliar o estudo sobre as propriedades rejuvenescedoras desse ácido

realizado por Melo Neto *et al.* (2022), que analisou teores do ácido em percentuais de 0%, 3% e 5%, deixando uma lacuna em relação a percentuais superiores aos estudados.

3.2.2 Dosagem da Mistura Asfáltica

O método de dosagem SUPERPAVE, normatizada pela ASTM D6925: 2015, foi utilizada para a determinar o percentual ideal de cada agregado e ligante asfáltico utilizado na mistura. Para isso foram realizadas combinações de agregados de tal forma que se obtivesse três composições granulométricas distintas e que satisfizessem os critérios SUPERPAVE e que estivessem enquadradas nos limites estabelecidos para faixa C do DNIT 031/2006 – ES. A Tabela 6 mostra as três composições granulométricas obtidas, sendo denominadas de “Curva inferior”, “Curva intermediária” e “Curva superior”.

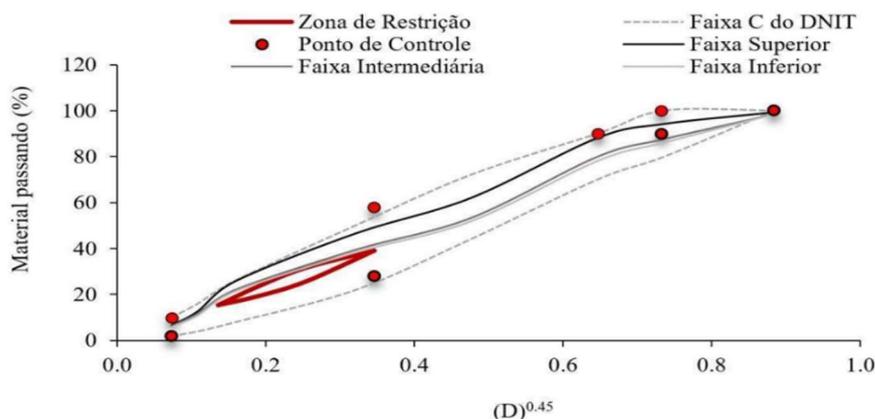
Tabela 6: Composição granulométrica das misturas asfálticas de controle

	Brita 19.0 mm	Brita 12.5 mm	Areia	Pó de Pedra	Cal
Inferior (%)	19	30	4	45	2
Intermediária (%)	15	27	5	51	2
Superior (%)	7	25	10	56	2

Fonte: Autor (2022)

O método SUPERPAVE contém a zona de restrição que corresponde a uma região gráfica em que as curvas granulométricas das misturas asfálticas não devem passar, tendo em vista que as curvas que se enquadram nessa região apresentam esqueleto pétreo fraco, ou seja, baixa resistência. Além disso, há os pontos de controle em que as curvas granulométricas devem passar para garantir uma boa resistência das misturas asfálticas. A Figura 8 apresenta as três curvas granulométricas obtidas, assim como a zona de restrição, pontos de controle e os limites do DNIT.

Figura 8: Curvas granulométricas, zona de restrição, pontos de controle e limites faixa C



Fonte: Autor (2022)

Para analisar qual curva granulométrica melhor enquadra-se nos critérios SUPERPAVE, foram produzidas misturas asfálticas para as três curvas granulométricas com teor de ligante virgem de 5% em peso total da mistura e foram moldados 2 corpos de prova (CPs) para cada mistura asfáltica. O Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS) foi utilizado para a compactação dos CPs seguindo a norma ASTM D6925: 2015. O nível de tráfego foi considerado de médio a alto e os esforços de compactação foram: 8 giros ($N_{inicial}$), 100 giros ($N_{projeto}$), e 160 giros ($N_{máximo}$). O teor de ligante de projeto foi analisado com base no $N_{projeto}$ e a compactação das misturas foram analisadas com base no $N_{inicial}$ e $N_{máximo}$. A Tabela 7 mostra os parâmetros calculados para as três composições granulométricas e os critérios SUPERPAVE.

Tabela 7: Parâmetros volumétricos das misturas com teor de ligante inicial

Composição granulométrica	Teor de ligante (%)	%Gmm @ $N_{inicial}$	%Gmm @ $N_{projeto}$	%Gmm @ $N_{máximo}$	VAM (%)	V _v (%)
Inferior	5	92	97,4	98,1	14,95	2,75
Intermediária	5	89,1	97,17	97,8	15,43	3,72
Superior	5	88,8	96,3	96,9	15,62	4,3
Critério SUPERPAVE		<89%	96%	<98%	≥13%	4%

Fonte: Autor (2022)

Comparando os resultados obtidos para cada curva granulométrica com os critérios SUPERPAVE, chega-se à conclusão de que a composição granulométrica que mais se aproxima dos critérios é a da curva intermediária.

Após isso, foram realizados procedimentos de testes de teores de ligantes para definir o teor ótimo de acordo com os critérios SUPERPAVE. Para isso, foram moldados dois corpos de prova com granulometria da curva intermediária para cada teor testado (4,25%, 4,75, 5,00%, 5,25% e 5,75%). A Tabela 8 apresenta os resultados dos parâmetros volumétricos para os teores de ligante testados, assim como a relação ligante-vazios (RBV) e a relação pó/ligante asfáltico (P/A).

Tabela 8: Parâmetros volumétricos da mistura de projeto

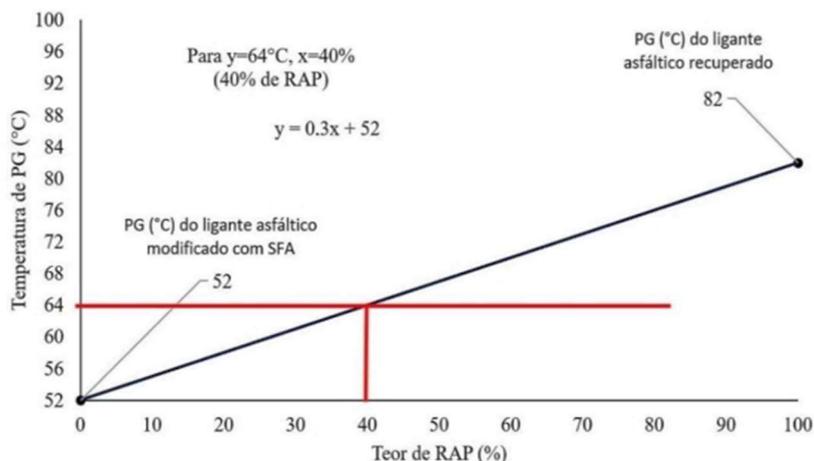
Teor de ligante (%)	%Gmm @Nprojeto	VAM (%)	V _v (%)	RBV (%)	P/A (%)
4,25	92,13	18,68	5,87	77,66	0,87
4,75	96,95	15,47	4,05	74,46	1,15
5	97,17	15,43	3,72	74,47	1,11
5,25	97,69	15,38	2,31	74,54	1,10
5,75	97,91	15,65	2,09	75,05	1,01
Critérios SUPERPAVE	96%	≥13%	4%	65-75	0,6-1,2

Fonte: Autor (2022)

O teor de ligante asfáltico que apresentou os melhores resultados em comparação com os critérios SUPERPAVE foi o teor de 4,75%, sendo este o teor escolhido para a produção da mistura asfáltica de controle.

3.2.3 Dosagem da Mistura Asfáltica Reciclada

O método *Blending Chart* (método B) foi utilizado para determinar o teor de RAP ideal para a dosagem da mistura asfáltica reciclada, sendo utilizado o dado da performance grade (PG) do ligante recuperado (82°C) e o PG do ligante asfáltico modificado com o teor de 7% de ácido graxo da borra do óleo de soja (52°C). Para o ensaio de *performance grade*, utilizou-se a norma ASTM D6373: 2021 para sua realização. A modificação do ligante asfáltico justifica-se pelo aumento da rigidez provocado pela adição RAP à mistura. A Figura 9 mostra o gráfico com o teor de RAP utilizado neste estudo.

Figura 9: Teor ideal de RAP para a mistura reciclada

Fonte: Autor (2022)

Como observa-se no gráfico, o percentual de RAP obtido foi de 40% para mistura asfáltica reciclada com temperatura de PG de trabalho de 64°C . Sendo assim, a dosagem da mistura asfáltica reciclada foi realizada de forma que a configuração granulométrica se enquadrasse na curva intermediária, assim como na mistura asfáltica de controle, visando obter o mesmo esqueleto pétreo.

Com a extração do ligante asfáltico presente no RAP, mostrada no item 3.1.2, observou-se um teor de ligante envelhecido de 5,49%, ou seja, para o percentual de 40% existe aproximadamente 2,2% de ligante asfáltico. Para atingir o mesmo teor de ligante asfáltico presente na mistura de controle (4,75%), é necessário adicionar a mistura reciclada aproximadamente de 2,55%. Todavia, segundo Wellner *et al.* (2015), o ligante presente no RAP interage parcialmente com o ligante virgem, sendo testados os teores de 2,5%, 2,75%, 3,00%, 3,25%, 3,50%, 3,75% e 4,00% a fim de determinar o teor que melhor satisfizesse os critérios SUPERPAVE, obtendo assim o teor de ligante virgem modificado de 3,5%. A Tabela 9 apresenta o percentual dos materiais utilizados na composição da mistura, assim como o teor de ligante de projeto e os parâmetros da dosagem da mistura asfáltica reciclada.

Tabela 9: Percentual dos materiais e parâmetros da dosagem da mistura asfáltica reciclada

	Brita 19,0 mm	Brita 12,5 mm	Pó de Pedra	Areia	Cal	RAP	Ligante asfáltico	Vazios de ar	Vazios no agregado mineral	Vazios preenchidos pelo ligante
%	14,1	17,1	23,5	0,9	0,9	40,00	3,5	3,9	16,3	75,3

Fonte: Autor (2022)

3.2.4 Ensaios Mecânicos das Misturas Asfálticas

A análise comparativa entre a mistura de controle e a reciclada foi realizada por meio dos ensaios de resistência à tração, dano por umidade induzida, módulo de resiliência e resistência a fadiga, tendo em vista que estes ensaios oferecem um bom panorama do desempenho das misturas, já que as maiores ocorrências de danos em misturas recicladas são devido à fratura, à fadiga e à umidade.

3.2.4.1 Resistência à Tração

O teste de resistência à tração das misturas asfálticas foi por compressão diametral (RT) e utilizou-se a norma DNIT 136:2018. No ensaio, duas forças diametralmente opostas são aplicadas no corpo de prova cilíndrico de 100 mm de diâmetro e 65 mm de altura. O carregamento estático crescente foi aplicado por meio de uma prensa mecânica a uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s. Por meio do anel dinamométrico acoplado à prensa foi realizada a leitura da carga de ruptura. A amostragem das misturas asfálticas foi em triplicata por composição e para o resultado do ensaio utilizou-se a média das tensões de ruptura dos corpos de prova.

3.2.4.2 Dano por Umidade Induzida

Utilizou-se para esse ensaio a norma DNIT 180:2018 que avalia o potencial de deslocamento da película de ligante asfáltico em misturas asfálticas sob ação da água em ciclos de gelo e degelo, medindo assim a adesividade que considera o efeito deletério da água sobre as propriedades de resistência das misturas. No ensaio foram utilizados seis corpos de prova (CPs) de cada grupo de mistura asfáltica moldados no Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS) nas dimensões de 100 mm de diâmetro de 68 mm de altura. A Figura 10 mostra os corpos de provas moldados e processos experimentais.

Figura 10: Ensaio *LOTTMAN*: a) Corpos de prova sendo submersos na água a uma temperatura de 60°C; b) Preparo dos corpos de prova para o processo de congelamento.

a)



b)



Fonte: Autor (2022)

Para realizar a compactação dos CPs foi utilizado apenas 30 giros com a finalidade de atingir o volume de vazios de $7 \pm 0,5\%$ preconizada pela norma. Os seis CPs foram divididos em dois grupos de três CPs cada, sendo apenas um grupo submetido aos ciclos de gelo-degelo. Após isso, os grupos foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral. A resistência à tração indireta do grupo submetido ao ciclo de gelo-degelo foi referida como “ C_{ts} ” e a resistência do outro grupo foi referida como “ U_{ts} ”. O *Tensile Strength Retained* “TSR” oferece o resultado deste ensaio por meio da equação a seguir.

$$TSR (\%) = \frac{C_{ts}}{U_{ts}} \times 100 \text{ (Equação 1)}$$

Onde:

C_{ts} = Resistência à tração condicionada em Mpa;

U_{ts} = Resistência à tração não condicionada em Mpa.

3.2.4.3 Módulo de Resiliência (MR)

A norma utilizada foi a DNIT 135:2018 a qual apresenta o método para medir a rigidez das misturas asfálticas a partir do módulo de resiliência, na configuração do ensaio de compressão diametral sob carga repetida. Com o CGS foram compactados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm de diâmetro e 64 mm de altura. Com auxílio do equipamento de ensaio UTM-25 foi aplicado sobre os CPs uma carga no formato de onda

haversine no plano diametral vertical. A Figura 11 mostra um CP sendo submetido ao esforço de compressão na UTM-25.

Figura 11: Ensaio de compressão diametral sob carga repetida



Fonte: Autor (2022)

A força de ruptura aplicada neste ensaio correspondeu a 10% da tensão obtido no ensaio de tração por compressão diametral. A frequência de carregamento utilizada foi de 1 Hz, que corresponde a 0.1 s de aplicação da carga seguido de 0.9 s de repouso. Devido à ação da carga aplicada gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação, acontece um deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada. Dois transdutores mecânicos eletromagnéticos do tipo *Linear Variable Differential Transducer* (LVDT) foram utilizados para medir o deslocamento horizontal sofrido pelos corpos de prova dos dois grupos de amostras de misturas asfálticas analisadas, a uma temperatura ambiente de 25°C.

3.2.4.4 Resistência à Fadiga

O ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada normatizada pela DNIT 183: 2018 foi utilizada para analisar a vida de fadiga das misturas asfálticas analisadas. Os CPs com dimensão de 100 mm de diâmetro e 64 mm de altura foram compactados no CGS e foram submetidos à compressão diametral, que gera um estado biaxial de tensão de tração perpendicular à direção da carga aplicada. Neste ensaio utilizou-se o equipamento UTM-25

para realizar a aplicação da carga, na forma pulsos de carregamentos *haversine* à frequência de 1 Hz, correspondendo a 0.1 s de aplicação seguindo de 0.9 s descanso.

Para o critério de parada do ensaio foi estabelecido o deslocamento final do atuador de 8 mm, de forma a garantir a ruptura completa do corpo de prova. A deformação dos CPs foi aferida por meio do sensor de deslocamento do atuador da UTM. A norma preconiza que o ensaio deve ser realizado com quatro cargas diferentes com níveis de tensões cujos valores estejam dentro do intervalo de 5% e 40% da resistência à tração indireta da mistura asfáltica.

Dois CPs de cada mistura asfáltica estudada foram ensaiados para cada nível de tensão escolhido, 45%, 42.5%, 40% e 37.5% da RT. A interpretação dos ensaios de fadiga é realizada, segundo Mocelin (2018), por meio de curvas que relacionam os níveis de tensão aplicados com o N das amostras, ajustadas por uma função exponencial, chamada de lei ou modelo de fadiga (Curvas de *Wöhler*). Com a determinação dos valores de N das amostras, plotou-se curvas desses valores versus a deformação de tração inicial (ϵ_i) e versus a diferença de tensões no centro das amostras ($\Delta\sigma$), em um gráfico log-log, para todos os níveis de tensão avaliados. Em seguida, ajustou-se uma linha de tendência aos dados de cada mistura por meio da regressão linear, seguindo o modelo de previsão de fadiga de *Wöhler* que utiliza as seguintes equações. A recomendação do DNIT é que a regressão linear deve apresentar R^2 mínimo de 0.8. As Equações 2 e 3 foram utilizadas para a determinação dos coeficientes.

$$N = k_2 \left(\frac{1}{\epsilon_i} \right)^{n_2} \text{ (Equação 2)}$$

$$N = k_2 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_3} \text{ (Equação 3)}$$

Onde:

N = número de ciclos de carregamento que leva a amostra à ruptura;

ϵ_i = deformação resiliente inicial;

$\Delta\sigma$ = diferença das tensões no centro do CP (MPa);

k_i e n_i = constantes obtidas na regressão linear dos pares N;

3.3 Teste Estatísticos

Nesta pesquisa, o teste t de Student foi utilizado para análise estatística dos resultados referentes aos ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência e dano por umidade induzida. Este teste de hipótese usa conceitos estatísticos para rejeitar ou aceitar uma hipótese

nula quando a estatística de teste (t) segue uma distribuição t de Student. Por exemplo, o teste t para médias de uma amostra mede a probabilidade de que a média da amostra tenha o valor observado, dada a média da população. Assim, foram estabelecidas as seguintes hipóteses: (i) hipótese nula = não há diferença estatisticamente significativa entre as médias das amostras; (ii) hipótese alternativa = existe diferença estatisticamente significativa entre as médias das amostras. A Equação 4 foi usada para calcular a estatística t :

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde: \bar{x} = média da amostra;

μ_0 = o valor fixo utilizado para comparação com a média amostral;

s = desvio padrão amostral;

n = tamanho da amostra.

Quanto maior o valor de t , mais confiança se tem ao rejeitar a hipótese nula, ou seja, mais certeza se tem ao afirmar que ela não é verdadeira. Se o t calculado for maior que o t tabulado para um determinado nível de significância do p -valor (5% usado neste estudo), então a hipótese nula é rejeitada. Na situação oposta, o valor está na região de aceitação, e a hipótese nula é aceita. A probabilidade de cometer um erro pode ser controlada selecionando o nível de significância do teste de hipótese (p -valor), porque o nível de significância do teste é, na verdade, a probabilidade de rejeitar ou aceitar a hipótese quando ela é verdadeira, assim como a probabilidade de cometer um erro.

3.4 Estimativas do Custo de Produção

O método para análise econômica apresentada por Melo Neto (2022) foi utilizado de maneira análoga nesse estudo, levando em consideração o critério de menor custo de produção da mistura asfáltica. A mistura asfáltica de controle serviu de referência para avaliar a viabilidade econômica da utilização da mistura asfáltica reciclada com a adição de 7% do ácido da borra do óleo de soja à mistura.

O código CPU9663 – Usinagem de concreto asfáltico – faixa C – areia e brita comerciais SEINFRA (Superintendência de Infraestrutura de Transportes) referente ao mês de abril de 2022 serviu de base para obtenção do preço da tonelada da mistura asfáltica a quente com a elaboração de uma composição de custos unitários dos materiais utilizados na mistura.

Como o RAP é um resíduo sem custo comercial gerado nos processos de manutenções de rodovias, o seu custo foi considerado nulo, sendo levado em consideração apenas o custo de transporte para obtenção desse material. Para o custo do ácido da borra do óleo de soja foi realizado uma média dos preços de sete empresas entre os meses de janeiro a abril de 2022. Os percentuais dos materiais obtidos nas dosagens das misturas foram utilizados para os cálculos dos custos, havendo a necessidade de converter as quantidades de cada material para a unidade referente no quadro de composição de custos apresentados no Quadro 1 no tópico 4.5 desse trabalho.

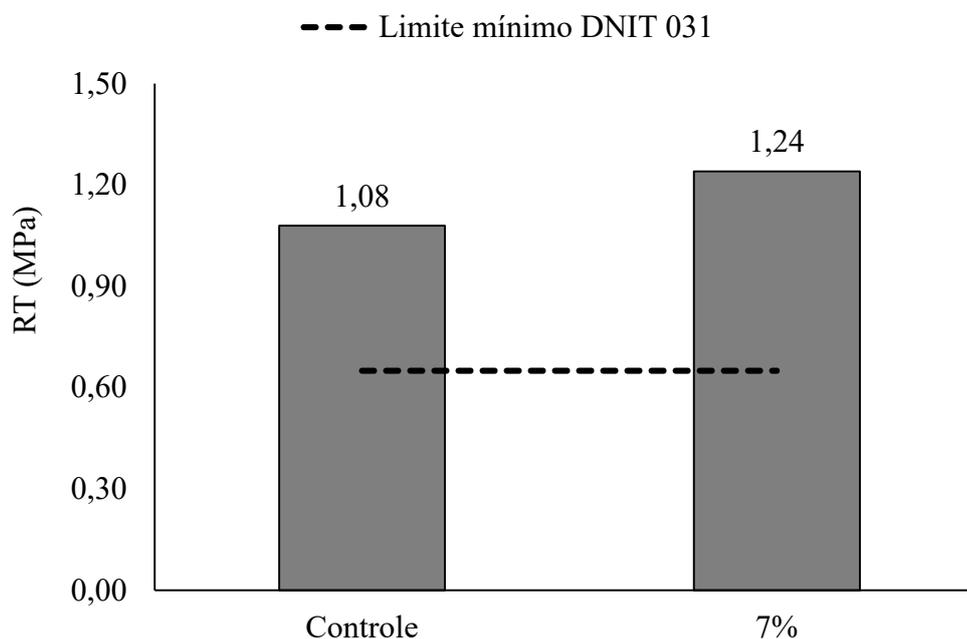
Para o custo de transporte dos materiais, foi considerado uma rodovia como sendo pavimentada na hipótese que os fornecedores dos insumos se encontram em localidades de fácil acesso à rodovia. Ademais, foi considerado uma distância média de transporte de 50 km, a qual foi embasada no Manual de Custos Médios Gerenciais (DNIT 2019). O custo de transporte dos materiais foi referente à quantidade de materiais para a produção de 1t de mistura asfáltica x 50 km referente à distância de transporte. O código IT9359 do quadro 1, apresentado no tópico de resultados, foi considerado para o transporte do ácido graxo da borra do óleo de soja.

4 RESULTADOS

Neste capítulo estão dispostos os resultados e as discussões dos ensaios mecânicos realizados na mistura asfáltica de controle (convencional) e na mistura asfáltica reciclada, na qual foi utilizada o ligante modificado com ácido da borra do óleo de soja (AGBS) no teor de 7% por peso de ligante asfáltico. Nesta seção também está a análise da estimativa de custo de produção dessas misturas asfálticas. Todos os ensaios mecânicos foram executados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP, localizado na Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

4.1 Resistência à Tração

A Figura 11 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) para a mistura asfáltica de controle e para a mistura reciclada com 7% de AGBS. Para as misturas asfálticas a quente, a norma (DNIT 031, 2006) determina um valor mínimo de 0,65 MPa a uma temperatura de 25°C para a resistência à tração. Como pode-se observar na Figura 12, ambas as misturas asfálticas satisfizeram essa condição normativa.

Figura 12: Ensaio de tração por compressão diametral

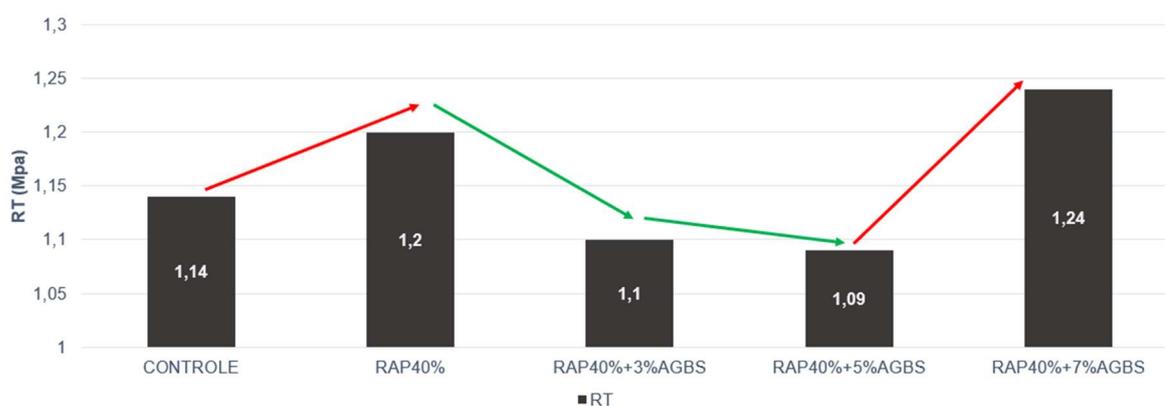
Fonte: Autor (2022)

Os resultados apontam que a adição de 40% RAP gerou um ganho de rigidez à mistura reciclada, que por sua vez apresentou um aumento na resistência à tração na ordem de 14,81% em comparação com a mistura de controle. Esse resultado corrobora com a hipótese da capacidade de recuperação das propriedades reológicas do ligante asfáltico presente no RAP com a adição do AGBS, atuando na mistura como um agente rejuvenescedor. Do ponto de vista econômico e ecológico esse resultado traz boas expectativas, tendo em vista a maior utilização de materiais reciclados em misturas asfálticas, fomentando a preservação de recursos naturais virgens e a economia de capitais proporcionado pela utilização de materiais reciclados.

Carvalho (2018) desenvolveu um estudo com óleo de girassol como agente rejuvenescedor (AR) em misturas asfálticas nos teores de 1%, 2% e 3% e os resultados de resistência à tração (RT) mostraram-se inversamente proporcional ao teor do AR na mistura, ou seja, quanto maior o teor de AR menor o valor de RT. No trabalho apresentado por Melo Neto (2022), as misturas asfálticas com o AGBS nos teores de 3% (RAP40%+3AGBS) e 5% (RAP40%+5AGBS) apresentaram uma diminuição da RT em comparação com a mistura asfáltica de controle e com a mistura reciclada sem agente rejuvenescedor (RAP40%), comportamento esse esperado devido a diminuição da rigidez da mistura conforme o aumento do teor do ácido graxo da borra do óleo de soja. Esse comportamento foi oposto ao observado neste trabalho, em que apresentou um aumento da RT, em comparação com o estudo de Melo

Neto (2022), mesmo utilizando um teor superior de AGBS (RAP40%+7%AGBS). A Figura 13 mostra os resultados de RT do estudo de Melo Neto em comparação com os resultados de RT deste estudo.

Figura 13: Comparação do RT com a literatura



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 13 pode-se observar uma tendência da redução da resistência à tração à medida que o teor de AGBS aumenta na mistura asfáltica reciclada do estudo de Melo Neto (2022), todavia a mistura com 7% de AGBS não obedeceu a essa tendência de redução de rigidez. Essa divergência pode ser justificada pela heterogeneidade do RAP, que não segue um comportamento linear em toda a amostragem do material, considerando a sua natureza de produção, que consiste na moagem de revestimento asfáltico que por muitas vezes apresenta variação de composição em seus trechos. Além disso, o tempo de estocagem e o grau de exposição a agentes degradantes pode ter causado variação de propriedade das amostras das duas pesquisas. Assim, ampliar o programa experimental com uma maior quantidade de corpos de prova para este ensaio traga uma confirmação da hipótese supracitada. Os resultados foram avaliados por meio do teste estatístico t de *student* a fim de verificar a significância dos dados (Tabela 10).

Tabela 10: Parâmetros do teste estatístico para o ensaio RT

Média	1,24
Variância	0,0036
Observações	3
Grau de liberdade	4
p-valor	0,0293

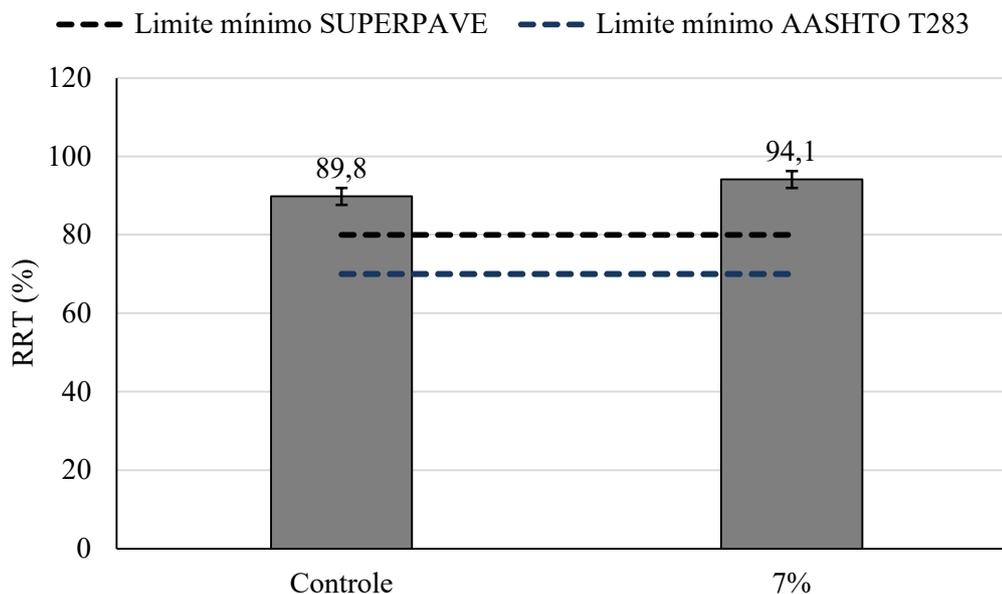
Fonte: Autor (2022)

O teste estatístico t de student apontou diferença estatisticamente significativa entre as médias dos valores de RT da mistura asfáltica de controle e a mistura asfáltica reciclada (7%). O p-valor (0,0293) obtido no teste foi inferior ao nível de significância de 5% (0,05), indicando que a hipótese nula de que não há diferença estatisticamente significativa entre as médias foi rejeitada. Assim, o desempenho de resistência à tração apresentado pela mistura asfáltica reciclada (7%) foi superior ao da mistura asfáltica de controle.

4.2 Dano por Umidade Induzida (LOTTMAN)

A Figura 14 apresenta os resultados do ensaio de resistência retida à tração (RRT) para a mistura asfáltica de controle e para a mistura reciclada com 7% do AGBS. Os valores mínimos da RRT adotados pela metodologia SUPERPAVE e pela norma AASHTO T 283 (2021) juntamente com a norma DNIT 031 (2006) são, respectivamente, 80% e 70%. Os dados obtidos para as duas misturas asfálticas analisadas foram superiores aos limites mínimos estabelecidos pelas normas.

Figura 14: Resistência retida à tração das misturas asfálticas



Fonte: Autor (2022)

Os resultados apontam um aumento da resistência aos efeitos deletérios da umidade da mistura RAP40%+7%AGBS na ordem de 4,79% em comparação com a mistura de controle. Os resultados deste ensaio mostraram-se alinhados com os resultados apresentados por Melo Neto (2022), em que houve aumento da resistência ao dano causado pela umidade induzida conforme o teor do AGBS era elevado nas misturas recicladas, tendo a mistura RAP40%+7%AGBS, neste estudo, apresentado RRT superior as misturas recicladas com teores de 3% e 5% de AGBS estudadas por Melo Neto (2022), respectivamente, 87,37% e 90,52%.

Outro estudo que mostrou-se alinhando com este trabalho é o de Goli e Lafit (2020) que estudou misturas asfálticas compostas por agregados calcários e misturas recicladas com teor de 40% de RAP e 3% de Sasobit como agente rejuvenescedor (AR). Os resultados apontaram uma melhora da RRT da mistura reciclada em torno de 80% com a adição do AR analisado. Na pesquisa realizada por Torres (2020), que buscou analisar o comportamento de misturas asfálticas recicladas modificadas com a adição de óleo vegetal residual, a mistura asfáltica reciclada apresentou uma redução da resistência retida à tração à medida que o teor de AR era aumentado na mistura, comportamento inverso ao observado com o AGBS, em que houve uma melhora do RRT com sua utilização nas misturas.

Esses resultados mostram uma melhor eficiência do ácido graxo da borra de óleo soja em comparação com o óleo vegetal residual, proporcionando às misturas asfálticas recicladas uma maior resistência retida à tração ao passo que se adicionar mais AR à mistura asfáltica.

Dessa forma, a ação do ácido graxo da borra do óleo de soja como um aditivo melhorador da resistência à umidade torna-se mais consolidada por meio desses resultados. A Tabela 11 apresenta os parâmetros estatísticos para o ensaio de dano por umidade induzida.

Tabela 11: Parâmetros estatísticos para o ensaio de RRT

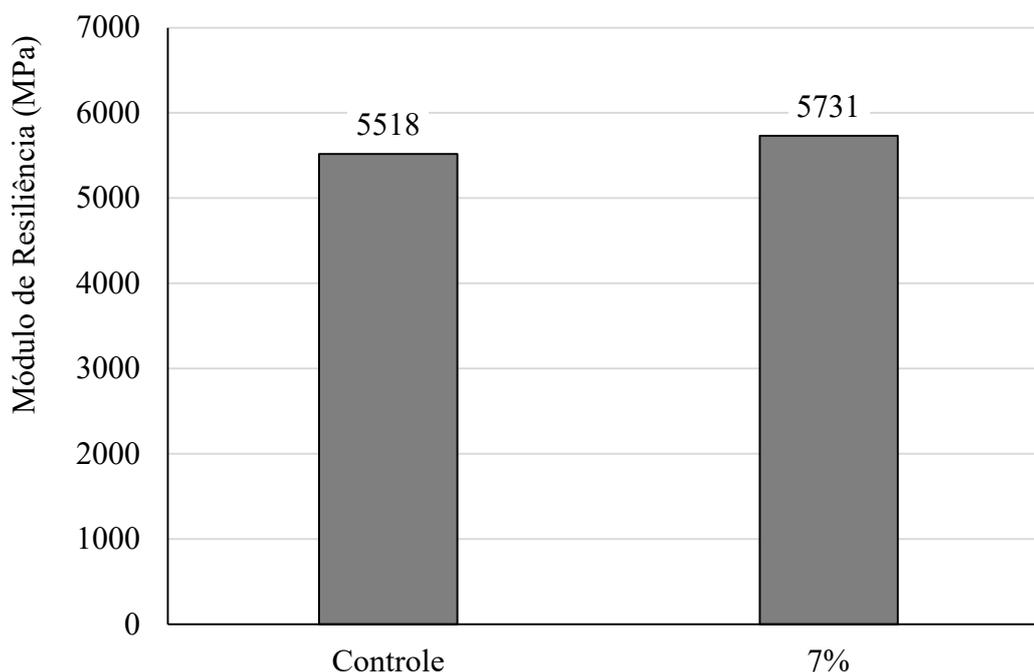
Média	94,1
Variância	0,36
Observações	3
Grau de liberdade	4
p-valor	0,014

Fonte: Autor (2022)

O teste estatístico t de student apontou diferença estatisticamente significativa entre as médias dos valores de RRT da mistura asfáltica de controle e a mistura asfáltica reciclada (7%). O p-valor (0,014) obtido no teste foi inferior ao nível de significância de 5% (0,05), indicando que a hipótese alternativa de que há diferença estatisticamente significativa entre as médias foi aceita. Assim, a mistura asfáltica de controle se apresentou mais suscetível ao dano deletério da água em relação à mistura asfáltica reciclada.

4.3 Módulo de Resiliência (MR)

A Figura 15 apresenta os resultados do ensaio do módulo de resiliência (MR) realizado nas misturas analisadas neste estudo. Os resultados apontam um aumento do módulo de resiliência da mistura asfáltica reciclada em relação à mistura de controle. Isso é reflexo da incorporação do RAP à mistura asfáltica, que aumentou a rigidez devido ao ligante envelhecido presente no RAP.

Figura 15: Módulo de resiliência das misturas asfálticas

Fonte: Autor (2022)

Suzuki (2019) apresentou um estudo que é possível identificar uma tendência clara do aumento do módulo de resiliência nas misturas asfálticas recicladas com alto teor de RAP (acima de 35% de RAP) em comparação com misturas asfálticas recicladas com baixo teor de RAP e misturas não recicladas. Goli e Lafiti (2020) também observaram essa tendência de aumento do MR das misturas asfálticas com 40% de RAP com relação à mistura asfáltica de controle. Torres (2020) por meio dos resultados desse ensaio, evidencia que o MR das misturas aumenta proporcionalmente ao aumento do RAP e mostra-se inversamente proporcional ao teor de agente rejuvenescedor na mistura asfáltica reciclada. Assim como nesse estudo, o aumento do teor de AR representou uma diminuição da rigidez das misturas.

No estudo apresentado por Melo Neto (2022), as misturas asfálticas recicladas apresentaram um aumento do módulo de resiliência em comparação com a mistura de controle. Todavia, aquelas não tiveram variação considerável do módulo de resiliência entre si, ou seja, mesmo aumentando o teor do ácido graxo da borra do óleo de soja na mistura, o MR permaneceu constante, o que não era esperado devido ao aumento do teor do ácido graxo da borra do óleo de soja. Pode-se justificar esse comportamento devido à pequena variação do AGBS entre as misturas, sendo os teores de 3% e 5% de AGBS insuficientes para diminuir com mais eficácia a rigidez do ligante envelhecido presente nos 40% RAP adotado nas misturas

recicladas. Ao comparar os resultados obtidos das misturas asfálticas recicladas com o estudo de Melo Neto (2022), observa-se uma diminuição do módulo de resiliência com o aumento do teor do ácido graxo da borra do óleo de soja, reflexo da ação do ligante modificado com 7% de AGBS. Dessa forma, pode-se confirmar a capacidade do AGBS de diminuir a rigidez da mistura e assim melhorar a capacidade de resistir aos esforços de tráfego das vias. A Tabela 12 apresenta os parâmetros obtidos no teste estatístico t de student para o ensaio de módulo de resiliência.

Tabela 12: Parâmetros estatísticos do ensaio de MR

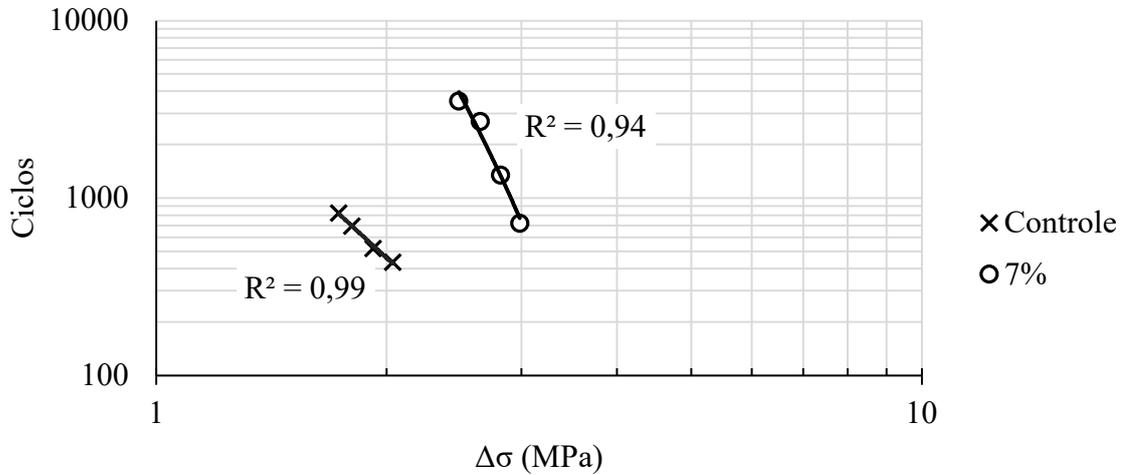
Média	5731
Variância	4087849
Observações	3
Grau de liberdade	4
p-valor	0,8754

Fonte: Autor (2022)

O teste estatístico t de student não demonstrou diferença estatisticamente significativa entre as médias dos valores de MR da mistura asfáltica de controle e a mistura asfáltica reciclada (7%). O p-valor (0,8754) obtido no teste foi superior ao nível de significância de 5% (0,05), indicando que a hipótese nula de que não há diferença estatisticamente significativa entre as médias foi aceita. Assim, a mistura asfáltica reciclada apresentou valor de módulo de resiliência equivalente à mistura asfáltica de controle, comportamento devido à perda de rigidez do RAP pelo uso do agente rejuvenescedor.

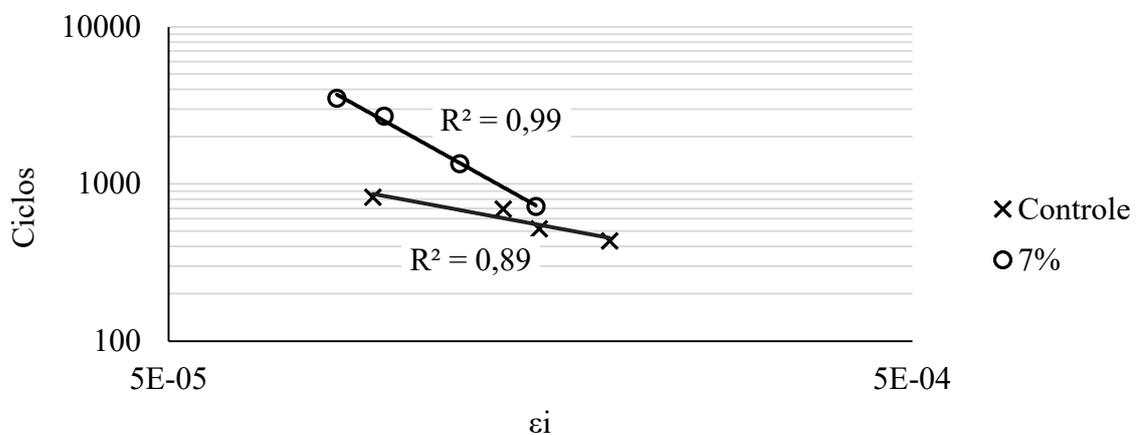
4.4 Resistência à Fadiga

A Figura 16 apresenta os resultados do ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em um diagrama log-log que relaciona o número de ciclos até a ruptura versus a diferença de tensão no centro do corpo de prova. O gráfico mostra que a mistura asfáltica reciclada foi capaz de resistir a um maior número de ciclos e a uma maior variação de tensões em comparação com a mistura de controle.

Figura 16: Número de ciclos suportados versus diferença de tensão

Fonte: Autor (2022)

Na Figura 17 está apresentado o resultado do ensaio de fadiga que relaciona o número de ciclos até a ruptura versus a deformação resiliente inicial. Sabe-se que a deformação resiliente é inversamente proporcional ao módulo de resiliência da mistura asfáltica, ou seja, quanto maior a rigidez da mistura menor será a deformação resiliente, sendo menos suscetíveis ao surgimento de trincas precoces. As curvas de Wöhler do gráfico acima mostra que a mistura asfáltica reciclada com ácido graxo da borra do óleo de soja no teor de 7% apresentou melhora de comportamento em comparação com a mistura de controle, resistindo a maiores números de ciclos e apresentando menor deformação resiliente.

Figura 17: Número de ciclos suportados versus deformação resiliente inicial

Fonte: Autor (2022)

Ao realizar uma análise comparativa dos resultados obtidos neste estudo com os dados apresentados no trabalho de Melo Neto (2022), pode-se observar que a adição de 7% do AGBS à mistura asfáltica reciclada, acarretou uma diminuição do número de ciclos suportada pela mistura asfáltica reciclada e um aumento da deformação resiliente em comparação com as misturas com teores de 3% e 5% de AGBS. Esse comportamento é reflexo da maior diminuição da rigidez provocado pelo ligante modificado com teor de 7% do ácido graxo da borra do óleo de soja. Dessa forma, pode-se identificar uma tendência na redução da rigidez das misturas asfálticas à medida que se aumenta o teor de ácido graxo no ligante asfáltico.

Os resultados das pesquisas de Wang *et al.* (2021) e Zhang *et al.* (2020), os quais investigaram misturas asfálticas recicladas com 40% de RAP e agente rejuvenescedor Sasobit com teores de 0,3% e 0,2% e um agente rejuvenescedor composto (óleo aromático + plastificante + agente anti-defasagem na proporção de 100:10:2) nos teores de 10% e 12%, mostraram condizentes com este trabalho, em que a adição de maiores percentuais de agente rejuvenescedor à mistura acarreta em uma maior vida útil do revestimento asfáltico reciclado em comparação com as misturas asfálticas de controle.

Os dados da resistência à fadiga apresentados por Suzuki (2019) em seu trabalho mostram que mesmo utilizando altos teores de RAP (50%) a mistura asfáltica reciclada foi capaz de resistir à fadiga em patamar ligeiramente inferior a misturas de controle. Com a adição de agente rejuvenescedor vegetal, a mistura apresentou uma melhora do desempenho em relação à fadiga, ultrapassando o desempenho apresentado pela mistura asfáltica de controle. Segundo a pesquisadora, isso evidencia a capacidade do agente rejuvenescedor de recuperar as propriedades do ligante asfáltico presente do RAP.

A fissuração por fadiga é um dos principais problemas que assolam as misturas asfálticas recicladas com altos teores de RAP, devido à rigidez provocada pelo ligante envelhecido. Dessa forma, os agentes rejuvenescedores de ligante asfáltico assumem o papel fundamental na produção desse tipo de mistura asfáltica, viabilizando a utilização de RAP em percentuais mais elevados e com ganho de desempenho à fissuração por fadiga em comparação com misturas asfáltica compostas apenas por materiais virgens.

4.5 Estimativa do Custo de Produção

No Quadro 1 está disposto a composição de custo para a produção da mistura asfáltica de controle e reciclada.

Quadro 1: Composição de custo das misturas asfálticas

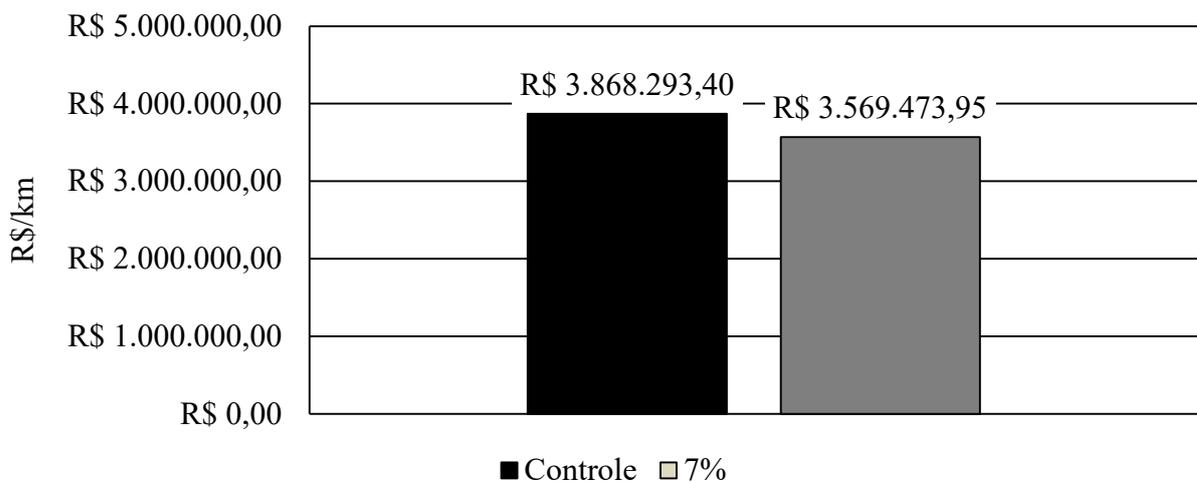
SEINFRA/SIT - Superintendência de Infraestrutura de Transportes - Serviço: CPU9663 - Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais								
2022				Unidade: t				
COMPOSIÇÃO			Unidade	Controle	7%	R\$	Custo Total R\$	
				Quantidade	Quantidade		Controle	7%
Item	Código	Descrição						
Mão de Obra	P9824	Servente	h	4,0000	4,0000	18,74	74,96	74,96
Equipamento	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	h	1,0000	1,0000	75,04	75,04	75,04
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m³ - 113 kW	h	1,0000	1,0000	156,76	156,76	156,76
	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	h	1,0000	1,0000	381,17	381,17	381,17
	E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	h	2,0000	2,0000	57,97	115,94	115,94
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	h	1,0000	1,0000	1060,25	1060,25	1060,25
Transporte	IT9665	Transporte de Agregado para Usinagem de Concreto Asfáltico – Caminhão basculante 10 m³	m³ x Km	18,4874	18,9816	1,50	27,73	28,47
	IT9359	Transporte de ligante asfáltico e ácido graxo da borra do óleo de soja, com caminhão com capacidade de 20000 l em rodovia pavimentada para distâncias médias de transporte igual ou inferior a 100 km.	t x KM	2,4000	1,7565	1,85	4,44	3,25
Material	M0028	Areia média	m³	0,018011	0,0034	126,75	2,28	0,43
	M0005	Brita 12.5 mm	m³	0,0979	0,0651	108,01	10,57	7,04
	M0191	Brita 19.0 mm	m³	0,0515	0,0511	108,01	5,56	5,52
	M0344	Filer – Cal hidratada a granel	m³	0,0112	0,0053	0,44	0,00	0,00
	M1103	Pó de Pedra	m³	0,1912	0,0924	112,78	21,56	10,43
	MAT8925	Ligante Asfáltico	t	0,0480	0,0326	5621,58	269,84	182,98
	-	Material fresado (RAP)	m³	0,0000	0,1623	0,00	0,00	0,00
	-	Ácido graxo da borra do óleo de soja	t	0,0000	0,0026	3550,00	0,00	9,16
Custo Total (R\$)							2206,11	2111,39

Fonte: Autor (2022)

No Quadro 1, para calcular o custo de produção da mistura asfáltica de controle e reciclada foi realizado o somatório da multiplicação da quantidade de cada insumo que compõe a mistura pelo custo unitário do insumo. Analisando o custo de produção de ambas as misturas, observa-se que a mistura com 7% de ácido graxo da borra do óleo de soja apresentou uma redução de custo de R\$ 94,72 (4,29%) em relação à mistura asfáltica de controle. Analisando unicamente os custos de produção, as duas misturas não divergem expressivamente uma da outra. Todavia, a mistura asfáltica reciclada com AGBS apresentou desempenho superior à mistura asfáltica convencional em todos os testes mecânicos realizados neste trabalho. Outro ponto importante é o ambiental, no qual a utilização de materiais reciclados ajuda na preservação do meio ambiente no tocante à diminuição da exploração da natureza com a extração de matérias-primas virgens e no despejo dos resíduos gerados nas manutenções dos pavimentos.

A Figura 18 apresenta o custo de produção das misturas asfálticas por km de rodovia. Considerou-se para os cálculos uma rodovia de 7 metros de largura e um nível de tráfego pesado (N) entre 10^7 e 5×10^7 , que requer 10 cm de camada de revestimento conforme o DNIT. Logo o volume de mistura asfáltica necessária para pavimentar 1 km de rodovia é 700 m^3 . O volume para 1 tonelada da mistura de controle e recicladas são, respectivamente, $0,3997 \text{ m}^3$ e $0,4148 \text{ m}^3$. Dessa forma, o custo para produzir 1 tonelada dessas misturas asfálticas equivalem a esses volumes obtidos.

Figura 18: Custo de produção das misturas asfálticas por km de rodovia



Fonte: Autor (2022)

A utilização de 40% RAP e 7% de ácido graxo da borra do óleo de soja (AGBS) em misturas asfálticas gerou uma economia de R\$ 298.8819,45 (7,72%) por km de rodovia. Ao comparar esses resultados com os obtidos por Melo Neto (2022), o qual apresentou redução de custo de produção na ordem de 7,73%, 7,63% e 7,56% para as misturas RAP40%, RAP40%+3%AGBS e RAP40%+5%AGBS, respectivamente; observa-se que o aumento do teor de AGBS não modificou significativamente o custo de produção das misturas asfálticas recicladas.

Pela busca por menores custos e impactos ambientais, Pereira (2020) desenvolveu uma pesquisa que buscou analisar economicamente a produção de misturas asfálticas com cinza de termelétrica, biochar e bio-óleo. Com a utilização desses materiais alternativos foi possível reduzir o custo de produção na ordem de 0,077%, 3,12% e 3,79% para as misturas asfálticas com cinza de termelétrica, bio-óleo e bio-óleo+biochar, respectivamente, em comparação com a mistura de controle analisada. Esses dados corroboram com os resultados econômicos deste trabalho, evidenciando a viabilidade da utilização de materiais alternativos para galgar benefícios econômicos e sociais, no tocante ao benefício coletivo causado pela preservação do meio ambiente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas por meio dessa pesquisa, assim como sugestões para pesquisas futuras que expandam o conhecimento sobre esse tema.

5.1 Considerações Finais

Esta pesquisa objetivou estudar a influência de maiores teores de ácido graxo da borra do óleo de soja em misturas asfálticas recicladas. A modificação do ligante asfáltico com 7% de AGBS não foi capaz de reduzir a temperatura máxima de PG do CAP 50/70 para patamares inferiores a 52°C, o que impossibilitou a utilização de teores de RAP superiores a 40% na mistura asfáltica reciclada. Assim, pôde-se concluir que:

- (1) Com a adição de RAP, a mistura asfáltica apresentou um ganho de rigidez devido à ação do ligante envelhecido, o que acarretou uma melhora da resistência à tração na ordem de 14,81% em comparação à mistura asfáltica de controle.

- (2) O uso de maior teor do agente rejuvenescedor produziu uma maior resistência aos efeitos deletérios da umidade na ordem de 4,79% em comparação com a mistura de controle. Além disso, o teor de 7% de AGBS reduziu o módulo de resiliência da mistura asfáltica reciclada, aproximando-se da rigidez da mistura de controle.
- (3) A mistura asfáltica reciclada foi capaz de resistir a um maior número de ciclos no ensaio de resistência a fadiga, apresentando um melhor comportamento a variações de tensões e menor deformação resiliente, comparada à mistura asfáltica de controle. Esses resultados apontam para uma maior vida de fadiga da mistura asfáltica reciclada, ou seja, maior vida útil.
- (4) A estimativa de custo realizada mostrou que o custo de produção da mistura asfáltica reciclada foi inferior ao custo de produção da mistura asfáltica de controle, redução de 7,72% por km de rodovia.

Dessa forma, pode-se concluir que o ácido graxo da borra do óleo de soja pode ser utilizado como modificador para produção de misturas asfálticas a quente, tendo potencial para a viabilização da utilização de RAP em misturas asfálticas recicladas, proporcionando ganho de desempenho e custo de produção inferior às misturas asfálticas tradicionais.

5.2 Sugestões para Pesquisas Futuras

A realização desse estudo possibilitou propor pesquisas envolvendo misturas asfálticas recicladas com o ácido graxo da borra do óleo de soja:

- (1) Avaliar o desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas com 40% de RAP e 7% de AGBS quanto ao módulo dinâmico e deformação permanente.
- (2) Realizar um estudo ambiental quanto à circularidade de misturas asfálticas produzidas com alto teor de RAP e AGBS.
- (3) Investigar a incorporação de teores acima de 7% de AGBS no ligante asfáltico classificado com penetração 50/70 a fim de reduzir a temperatura de PG (<52°C).
- (4) Analisar o uso de AGBS em ligantes asfálticos modificados por Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) antes e após envelhecimento.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-JABER, Mu'tasim. *et al.* Mechanical properties evaluation of asphalt mixtures with variable contents of reclaimed asphalt pavement (RAP). **Results in Engineering**. V. 14. 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100463> >. Acesso em: 30 de outubro de 2022.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. **AASHTO T 283**: Standard Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. Estados Unidos, 2014.
- AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY. **AOCS Ca 2c-25**: Moisture and Volatile Matter, in animal and Vegetable Fats, Air Oven Method. Estados Unidos, 2017.
- AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY. **AOCS Ca 5a-40**. Free Fatty Acids in Crude and Refined Fats and Oils. Estados Unidos, 1997.
- AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY. **AOCS Ca 6a-40**: Unsaponifiable Matter in Fats and Oils, Except Marine Oils. Estados Unidos, 2017.
- AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY. **AOCS G 3-53**: Total Fatty Acids, Oxidized Fatty Acids, Wet Extraction Method. Estados Unidos, 2017.
- AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY. **AOCS G 5-40**: Neutral Oil in Soapstock, Unsaponifiable Material. Estados Unidos, 2017.
- AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY. **AOCS G 7-56**: Ph of Acidulated Soapstocks. Estados Unidos, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1252**: Standard Test Method for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading). Estados Unidos, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 127M**: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. Estados Unidos, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 131M**: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. Estados Unidos, 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2172**: Standard Test Method for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures. Estados Unidos, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2419**: Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate. Estados Unidos, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 36M-14**: Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and 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 4791**: Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. Estados Unidos, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6373**: Standard Test Method for Performance-Graded Asphalt Binder. Estados Unidos, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6925**: Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Asphalt Mix Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor. Estados Unidos, 2015.

ARAÚJO, Anderson Magalhães. **Borra de óleo de soja: caracterização físico-química e avaliação da potencialidade econômica**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2016. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/34614>>. Acesso em: 22 de novembro de 2022.

ARAÚJO, Luciana Michèlle Dellabianca. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. Tese. Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal. 2004. Disponível em: <<https://doceru.com/doc/nnc5sev>>. Acesso em: 28 de setembro de 2022.

BEHNOOD, Ali. Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review. **Journal of Cleaner Production**. V. 231. P. 171-182. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.209>>. Acesso em: 02 de outubro de 2022.

BERNUCCI, L.; MOTTA, L.; CERATTI, J.; SOARES, J. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2008.

BONFIM, Valmir. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3. ed. rev. São Paulo - SP: Suiang G. Oliveira, 2010. ISBN 978-85-60735-00-6. Disponível em: http://fresagem.com.br/wp-content/uploads/2017/08/valmir_bonfim_livro_fresagem_de_pavimentos_asfalticos_pt.pdf. Acesso em: 29 de setembro de 2022.

BRASIL. ANTT. **Reciclagem de Pavimentos Asfálticos com Espuma de Asfalto Etapa 1: Estudo Laboratorial**. 2018. Disponível em: <<https://portal.antt.gov.br/documents/20122/0/Reciclagem+de+Pavimentos+Asf%C3%A1lticos+com+Espuma+de+Asfalto+Etapa+1+Estudo.pdf/8e75eb14-449e-199e-1f82-305972afcb01?t=1650989922094>>. Acesso em: 26 de setembro de 2022.

BRASIL. DNIT. **Manual de Pavimentação**. Publicação IPR-719. 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr_719_manual_de_pavimentacao_versao_corrigida_errata_1.pdf>. Acesso em 01 de julho de 2022.

Brasil. DNIT. **Pavimento asfáltico – Fresagem a frio – Especificação de serviço**. Publicação IPR. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e->

pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_159_2011_es.pdf>. Acesso em 26 de outubro de 2022

CARUSO, R. **Soja: uma caminhada sem fim**. CCD Editora Ltda. 1998.

CARVALHO, J. R. **Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2018. Disponível em:< <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/397>>. Acesso em: 23 de novembro de 2022.

COELHO, Vladimir. **Contribuição ao estudo das deformações permanentes, naq condições do Brasil, em camadas de concreto asfáltico de pavimento**. Universidade de São Paulo. São Carlos. 1996.

CONFEDERAÇÃO Nacional do Transporte. *In: PEC da Infraestrutura pode reverter queda de investimentos públicos em transporte*. [S. l.], 22 fev. 2022. Disponível em: <https://cnt.org.br/agencia-cnt/pec-da-infraestrutura-pode-reverter-quebras-de-investimentos>. Acesso em: 01 de julho de 2022.

DA FRÉ, Nicéia Chies. **Obtenção de ácido graxo a partir da acidulação de borra de neutralização de óleo de soja**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2009. Disponível em:<<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/17498/000717847.pdf?sequence=1&isAllo wed=y>>. Acesso em 09 de outubro de 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031**: Concrete asfáltico – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 135**: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136**: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 158**: Mistura asfáltica – Determinação da porcentagem de betume em mistura asfáltica utilizando o extrator Soxhlet – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 180**: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 183**: Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT**: Manual de Custos Médios Gerenciais. Rio de Janeiro, 2018.

DOWN, Micheil K. Gas chromatographic characterization of soapstocks from vegetable oil refining. **Journal of Chromatography A**. v. 816. p. 185-193. 1998. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(98\)00503-2](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(98)00503-2)>. Acesso em 10 de outubro de 2022.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Universidade Federal de Santa Catarina. 545 p., 2009. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/9601>>. Acesso em: 25 de setembro de 2022.

FWA, T. F. **Evaluation of Engineering Benefits of RJSeal Report prepared for Kalvani International Pte Ltd**. Department of Civil Engineering. National University of Singapore. 2006. Disponível em: <<http://www.rejuvaseal.com.hk/data/TestRpt43.pdf>>. Acesso em: 05 de outubro de 2022.

GASPAR, Magna Alves Viana; PINHEIRO, José Guilherme Leitão. ESTUDO DESCRITIVO DAS PRINCIPAIS PATOLOGIAS ENCONTRADAS EM PAVIMENTAÇÕES ASFÁLTICAS DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Episteme Transversalis**, [S.l.], v. 12, n. 3, dez. 2021. ISSN 2236-2649. Disponível em: <<http://revista.ugb.edu.br/ojs302/index.php/episteme/article/view/2441>>. Acesso em: 02 de julho de 2022.

Goli H, Latifi M (2020) Evaluation of the Effect of Moisture on Behavior of Warm Mix Asphalt (WMA) Mixtures Containing Recycled Asphalt Pavement (RAP). **Construction and Building Materials**. V. 247. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118526>>. Acesso em: 23 de novembro de 2022.

JACQUES, Guilherme Ebani- **Análise Mecânica-Empírica de um Pavimento Dimensionado pelo Método do DNER: Estudo de caso da Duplicação da Rodovia RSC-287 em Santa Cruz do Sul**. Trabalho apresentado para obtenção de Bacharel em Engenharia Civil – Faculdade UNISC Santa Cruz do Sul, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11624/1145>>. Acesso em: 25 de setembro de 2022.

LAGOS-VARAS *et al.* Influence of limestone filler on the rheological properties of bituminous mastics through susceptibility master curves. **Construction and Building Materials**. V. 231. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117126>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2022.

MAG, T.K.; GREEN, D.H.; Kwong, A.T. Acidulação contínua de sabão e recuperação de óleo ácido. **Journal of the American Oil Chemists' Society**. v. 59, p.1008-1011. 1983. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF02660217>>. Acesso em: 11 de outubro de 2022.

MAH, Victor. **Concepto of P4 – Perpetual Pavement Presentation Process**. PRIPavement Rejuvenation International. 2016.

Melo Neto, Osires de Medeiros *et al.* Viabilidade de misturas asfálticas recicladas com ácido graxo de borra de óleo de soja. **Construction and Building Materials**. V. 349: 128728. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128728>>. Acesso em: 10 de julho de 2022.

MELO NETO, Osires de Medeiros. **Viabilidade de misturas asfálticas recicladas com ácido graxo da borra do óleo de soja**. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Paraíba. 2022. Disponível em:

<<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/25583>>. Acesso em: 02 de julho de 2022.

MOCELIN, M. **Avaliação do comportamento à fadiga de misturas asfálticas quentes e mornas através do modelo de dano contínuo viscoelástico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

Disponível em:<<http://hdl.handle.net/10183/181261>>. Acesso em: 01 de novembro de 2022.

MOHAMMADAFZALI, Mojtaba. *et al.* Aging of Rejuvenated Asphalt Binders. **Hindawi**, v. 2017, p. 1-13.2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1155/2017/8426475> >. Acesso em: 02 de julho de 2022.

OLIVEIRA, Matheus Silva. **Análise de fadiga de misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de RAP**. Brasília, Distrito Federal. 2022. Disponível em:< <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01132>>. Acesso em: 26 de setembro de 2022.

OLIVIERA, Everton Narciso de. *et al.* Estudo descritivo da fadiga em pavimentos flexíveis. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v, 11. Nº.1. 2019. Disponível em:

<<https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/12704/209209210805> >. Acesso em: 25 de setembro de 2022.

OSMARI, Patrícia Hennig; ARAGÃO, Francisco Thiago Sacramento. Avaliação do resíduo de óleo vegetal como agente rejuvenescedor de ligantes a partir de análises reológicas e de morfologia de superfície. **Transportes**. v, 24. 2016. Disponível

em:<<https://doi.org/10.14295/transportes.v24i3.1147>>. Acesso em: 03 de julho de 2022.

PENZ, Gustavo. **Propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas com adição de zeólitas sintetizadas**. 2010. Monografia (Graduação em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PEREIRA, Igor Novato Almeida. **Análise econômica da produção de misturas asfálticas com cinza de termoelétrica, biochar e bioóleo**. Universidade Federal do Amazonas. Manaus – Amazonas. 2020. Disponível em:< <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/7980>>. Acesso em: 13 de outubro de 2022.

SANTOS, Felipe Brandão; FAXINA, Adalberto Leandro. **Estudo da incorporação de bio-óleos à base de soja como agentes rejuvenescedores de ligantes asfálticos**. Universidade de São Paulo. 2019. Disponível

em:<https://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019v1.1/Infraestrutura/Materiais%20e%20Tecnologias%20Ambientais%20III/1_604_RT.pdf>. Acesso em: 06 de outubro de 2022.

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

Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.087>>. Acesso em: 11 de dezembro de 2022.

SILVA, João Paulo Souza. **Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas**. Tese. Publicação G.TD-067/11. Universidade de Brasília. Brasília, Distrito Federal. 2011. Disponível em: < <https://repositorio.unb.br/handle/10482/8705>>. Acesso em: 03 de outubro de 2022.

SILVA, João Paulo Souza; FARIAS, Márcio Muniz. Avaliação química e ambiental de misturas asfálticas rejuvenescidas. **Revista Matéria** – UFRJ. V.23 nº03. 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0523>>. Acesso em: 27 de setembro de 2022.

SILVA, João Paulo Souza; FARIAS, Márcio Muniz. Estudo dos efeitos de produtos rejuvenescedores no comportamento físico, químico e reológico de ligantes asfálticos envelhecidos. **Revista Transportes**. v. 28. n. 3. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.14295/transportes.v28i3.1874>>. Acesso em: 05 de outubro de 2022.

SUZUKI, K. Y. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2019. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-21082019-141957/publico/KarinaYurikoSuzukiCorr19.pdf>>. Acesso em: 23 de novembro de 2022.

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.

TORRES, Paulo Roberto Barreto *et al.* Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas modificadas com a adição de óleo vegetal residual. **Revista Transportes**. v. 30. n. 01. 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.14295/transportes.v30i1.2585> >. Acesso em: 07 de outubro de 2022.

TORRES, Paulo Roberto Barreto. **Estudo de misturas asfálticas modificadas com a adição de óleo vegetal residual**. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Paraíba. 2020. Disponível em: < <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/17902> >. Acesso em: 03 de outubro de 2022.

UNGUREANU, Dragoy. Testes acelerados de uma estrutura rodoviária reciclada feita com material de pavimento asfáltico. **Construction and Building Materials**. v, 262. p, 1-16. 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120658>>. Acesso em: 26 de setembro de 2022.

Wang, Di *et al.* Investigation on the effect of high amount of Re-recycled RAP with Warm mix asphalt (WMA) technology. **Construction and Building Materials**. V. 312. 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125395>>. Acesso em: 23 de novembro de 2022.

Wróbel, Michay. *et al.* Properties of the reclaimed asphalt pavement mixture with organic rejuvenator. **Construction and Building Materials**. v, 271. p, 1-10. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121514>>. Acesso em: 02 de julho de 2022.

XINXIN, Cao *et al.* Investigation on Possibility of Waste Vegetable Oil Rejuvenating Aged Asphalt. **Applied Sciences**. V. 8. Chongqing Jiaotong University. China. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/app8050765>>. Acesso em: 02 de outubro de 2022.

Yu, Xiao kong. *et al.* Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders. **Fuel**. v, 135. p, 162-171. 2014. Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.038>>. Acesso em: 03 de julho de 2022.

ZAGONEL, Ana Regina. **Inovações em Revestimentos Asfálticos Utilizados no Brasil. 2013.** Ijuí, Rio Grande do Sul, 2013.

ZAHOOR, Muhammad. *et al.* Recycling asphalt using waste bio-oil: A review of the production processes, properties and future perspectives. **Process Safety and Environmental Protection**. v, 147. p, 1135-1159. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.032>>. Acesso em: 02 de julho de 2022.

ZHANG, Jizhe *et al.* Influence of Different Rejuvenating Agents on Rheological Behavior and Dynamic Response of Recycled Asphalt Mixtures Incorporating 60% RAP Dosage. **Construction and Building Materials**. V. 238. 2020. Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117778>>. Acesso em: 24 de novembro de 2022.

ZHANG, Jizhe. *et al.* Evaluation on the mechanical performance of recycled asphalt mixtures incorporated with high percentage of RAP and self-developed rejuvenators. **Construction and Building Materials**. v, 269. 2021. Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121337>>. Acesso em: 02 de julho de 2022.

ZHANG, Ran *et al.* Using bio-based rejuvenator derived from waste wood to recycle old Asphalt. **Construction and Building Materials**. v. 189. p. 568-575. 2018. Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.201>>. Acesso em: 06 de outubro de 2022.

ZHAO, Sheng *et al.* Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**. V. 44. P. 92-100. 2013. Disponível em:< <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.010>>. Acesso em: 01 de outubro de 2022.