



UEPB

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII – ARARUNA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

FLÁVIA MARIA MENDES DA SILVA

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) E
RESÍDUO DE ÓLEO VEGETAL EM MISTURA ASFÁLTICA**

**ARARUNA-PB
2023**

FLÁVIA MARIA MENDES DA SILVA

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) E
RESÍDUO DE ÓLEO VEGETAL EM MISTURA ASFÁLTICA**

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

Área de concentração: Pavimentação.

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

**ARARUNA-PB
2023**

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.

S586e Silva, Flavia Maria Mendes da.
Estudo de viabilidade de reclaimed asphalt pavement (rap) e resíduo de óleo vegetal em mistura asfáltica [manuscrito] / Flavia Maria Mendes da Silva. - 2023.
66 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2023.

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

1. Asfalto. 2. Custos. 3. Reologia. 4. Pavimentação. I.

Título

21. ed. CDD 625.85

FLÁVIA MARIA MENDES DA SILVA

ESTUDO DE VIABILIDADE DE RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) E
RESÍDUO DE ÓLEO VEGETAL EM MISTURA ASFÁLTICA

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

Área de concentração: Pavimentação.

Aprovado em: 05/07/2023.

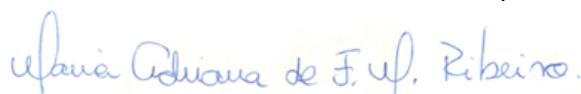
BANCA EXAMINADORA



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



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



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

Aos meus amados pais: Por seus ensinamentos, companhia e amor, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente por me conceder a oportunidade de buscar o conhecimento, por me guiar em cada passo dessa jornada e por me capacitar com sabedoria e discernimento.

Aos meus pais Marcelo e Rivanalbia. Vocês foram meu porto seguro, meus pilares de força e sabedoria. Sempre acreditaram em mim, mesmo quando eu duvidava de mim mesma. Cada conquista que alcancei é resultado direto dos seus ensinamentos e do amor que me deram.

Aos meus irmãos, em especial Wendell, que esteve ao meu lado durante toda essa jornada, nossas risadas, nossas conversas e nossa cumplicidade fizeram com que cada obstáculo se tornasse mais fácil de superar.

Aos meus tios e tias que sempre se preocuparam comigo enquanto estive fora. Todo meu amor, carinho e agradecimento.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Osires de Medeiros, por sua orientação, paciência e dedicação ao longo deste projeto. Além do seu papel como orientador, agradeço por ter se mostrado sempre disponível para ouvir minhas dúvidas e preocupações.

Aos meus amigos, em especial Jeferson Gomes, Kallyanne Pereira, Jackson Lucas, Valdiclécio Costa, Lissa Furtado, Carine Almeida, Suzane Gonçalves, Keneet Anderson, Amanda Xavier, Julia Costa, Sara Ramona, Yasmin Guimarães, Leonardo Borges e Lucas Almeida, verdadeiros anjos em minha vida, obrigado por cada palavra de incentivo, por cada abraço reconfortante e por cada momento de descontração que vivemos juntos. Vocês me apoiaram nos momentos mais difíceis e celebraram comigo cada vitória. Cada um de vocês tem um lugar especial em meu coração.

Ao meu professor de matemática do ensino médio Edson Filho, por toda sua paciência, minha profunda gratidão por todo o impacto positivo que você teve em minha vida como meu professor, embora os anos tenham se passado desde que fui sua aluna, as lições que aprendi em suas aulas continuam vivas em minha mente.

Por fim, gostaria de agradecer aos meus professores da graduação e a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para minha formação e que não foram citados acima, sintam-se abraçados e recebam meu muito obrigada.

"Mas os que confiam no SENHOR renovam suas forças; voam alto, como águias. Correm e não se cansam, caminham e não desfalecem."

Isaías 40:31

RESUMO

O modal rodoviário é o mais utilizado no país, gerando custos de investimentos e manutenção das rodovias brasileiras, o que torna necessária a utilização de materiais que gerem maior durabilidade e economia. A área de biomateriais tem se destacado na engenharia em virtude do uso de recursos renováveis e a possibilidade de produção *in loco*. Nesse ínterim, este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento mecânico e o custo de produção de uma mistura asfáltica com 40% de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) e 6% de ácido graxo da borra do óleo de soja (AGBS) como agente de reciclagem identificando a viabilidade do emprego de materiais alternativos sustentáveis. Para tanto, realizaram-se ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência, dano por umidade induzida e vida de fadiga para a mistura com RAP e teor de 6% de ácido graxo e uma mistura asfáltica de parâmetro (sem RAP). A verificação da significância dos dados foi realizada por meio do teste estatístico t de *student*. Ademais, realizou-se uma estimativa de custo de produção da mistura asfáltica de parâmetro e da mistura asfáltica reciclada para fins comparativos. Os resultados indicaram que a adição de 40% de RAP e uso do AGBS em 6% aumentou em 33,33% a resistência à tração da mistura reciclada, tornando-a mais rígida em comparação com a mistura de referência. A mistura de referência apresentou uma resistência à tração menor, enquanto a mistura contendo RAP e AGBS mostrou um resultado superior em 6,57%, embora os valores fossem próximos entre si. Comparando as duas misturas, analisando os resultados do módulo de resiliência a mistura reciclada com 6% de AGBS apresentou um aumento de 36,93% em relação à mistura de referência. Por fim, no teste de fadiga, a mistura reciclada suportou um número maior de ciclos e uma variação de tensões maior do que a mistura de referência. Em síntese, a verificação de valores na análise do teste t de Student, mostram que o valor de p bicaudal foi inferior ao valor do nível de significância. Conclui-se que, o uso de AGBS (6%) e RAP pode ser uma alternativa viável e sustentável para a pavimentação, contribuindo para o aumento da durabilidade e desempenho das estruturas asfálticas. Diante da análise econômica, o uso de agente rejuvenescedor é de baixo custo e não interfere no custo total de produção da mistura asfáltica, já o uso do RAP permite uma diminuição do custo total da produção.

Palavras-chave: Ácido graxo da borra do óleo de soja; Custos; Desempenho mecânico; Misturas asfálticas recicladas; Reologia.

ABSTRACT

The road modal is the most used in the country, generating investment and maintenance costs for Brazilian highways, which makes it necessary to use materials that generate greater durability and economy. The area of biomaterials has stood out in engineering due to the use of renewable resources and the possibility of on-site production. In the meantime, this work aimed to analyze the mechanical behavior and production cost of an asphalt mixture with 40% of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) and 6% of soybean oil sludge fatty acid (AGBS) as a recycling agent, identifying the feasibility of using sustainable alternative materials. For this purpose, tests of tensile strength, modulus of resilience, damage by induced moisture and fatigue life were carried out for the mixture with RAP and 6% fatty acid content and a parameter asphalt mixture (without RAP). The verification of the significance of the data was performed using the Student's t test. Furthermore, an estimate of the production cost of the parameter asphalt mixture and the recycled asphalt mixture was carried out for comparative purposes. The results indicated that the addition of 40% RAP and the use of AGBS at 6% increased the tensile strength of the recycled mixture by 33.33%, making it more rigid compared to the reference mixture. The reference mixture showed a lower tensile strength, while the mixture containing RAP and AGBS showed a superior result by 6.57%, although the values were close to each other. Comparing the two mixtures, analyzing the results of the resilience modulus, the mixture recycled with 6% AGBS showed an increase of 36.93% in relation to the reference mixture. Finally, in the fatigue test, the recycled mixture withstood a greater number of cycles and a greater stress variation than the reference mixture. In summary, the verification of values in the analysis of Student's t test, show that the bicaldal p value was lower than the value of the significance level. It is concluded that the use of AGBS (6%) and RAP can be a viable and sustainable alternative for paving, contributing to increase the durability and performance of asphalt structures. In view of the economic analysis, the use of a rejuvenating agent is low cost and does not interfere with the total production cost of the asphalt mixture, while the use of RAP allows a decrease in the total cost of production.

Keywords: Fatty acid from soybean oil dregs; Costs; Mechanical performance; Recycled asphalt mixtures; Rheology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma das etapas de realização desta pesquisa	23
Figura 2 - Curva granulométrica de agregados naturais	24
Figura 3 - Curva granulométrica de agregados RAP	28
Figura 4 - Borra do óleo de soja <i>in natura</i>	28
Figura 5 - Processo de acidulação da borra do óleo de soja	30
Figura 6 - Fluxograma da sequência de atividades	32
Figura 7 - Processo de modificação do ligante asfáltico	33
Figura 8 - Gráfico contendo as curvas granulométricas (superior, intermediária e inferior), pontos de controle, zona de restrição e faixa C	34
Figura 9 - Teor de RAP a ser adicionado a mistura asfáltica	36
Figura 10 - Corpo de prova submetido a compressão diametral	38
Figura 11 - Amostras compactadas cilíndricas saturadas com água	39
Figura 12 - Fluxograma básico para realizar o teste t de Student.....	43
Figura 13 - Resultados das misturas asfálticas submetidas ao ensaio de resistência a tração por compressão diametral.....	45
Figura 14 - Ensaio de resistência a tração por compressão diametral comparação com a literatura.....	46
Figura 15 - Resultados das misturas asfálticas submetidas ao ensaio de dano por umidade induzida	48
Figura 16 - Ensaio de resistência retida à tração comparação com a literatura	49
Figura 17 - Resultados das misturas asfálticas submetidas ao ensaio de módulo de resiliência.....	50
Figura 18 - Ensaio do módulo de resiliência comparação com a literatura.....	50
Figura 19 - Número de ciclos suportados até a ruptura versus a diferença de tensão no centro do CP	52
Figura 20 - Número de ciclos suportados até a ruptura versus a deformação inicial permanente	52
Figura 21 - Custo das misturas asfálticas por quilômetro de rodovia.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de caracterização de agregados naturais	25
Tabela 2 - Resultados da caracterização do ligante asfáltico	26
Tabela 3 - Resultados da caracterização dos agregados RAP	27
Tabela 4 - Resultados dos ensaios de caracterização da borra do óleo de soja.....	29
Tabela 5 - Caracterização do ligante asfáltico virgem (puro)	31
Tabela 6 - Composição da granulometria de misturas asfálticas de parâmetro	33
Tabela 7 - Parâmetros volumétricos das misturas analisadas com teor de ligante inicial	35
Tabela 8 - Parâmetros volumétricos das misturas de projeto analisadas	35
Tabela 9 - Custeio de produção das misturas asfálticas	53
Tabela 10 - Dados do teste estatístico para o ensaio de Resistência à tração	56
Tabela 11 - Dados do teste estatístico para o ensaio de Resistência retida à tração.....	56
Tabela 12 - Dados do teste estatístico para o ensaio de Módulo de Resiliência.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASTHO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGBS	Ácido Graxo da Borra do Óleo de Soja
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AOCS	American Oil Chemists Society
AR-5	Agente rejuvenescedor à base de óleo de xisto
AREF	Mistura de Referência
CAP 50-70	Cimento Asfáltico de Petróleo – Grade 50/70
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CGS	Compactador Giratório SUPERPAVE
CP	Corpo de prova
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
GOINFRA	Agência Goiana de Infraestrutura e Transportes
H1	Hipótese Alternativa
HO	Hipótese Nula
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LVDT	Linear Variable Differential Transducer
MR	Módulo de Resiliência
MSCR	Multiple Stress Creep Recovery
N	Nível
NBR	Norma Brasileira
PG	Performance Grade
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
RBV	Relação Betume-Vazios
RRT	Resistência Retida à Tração
RT	Resistência à Tração
RTFOT	Rolling Thin Film Ovens
SEINFRA	Secretaria de Infraestrutura
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
SICRO	Sistema de Custos Rodoviários
SSFA	Soy Oil Sludge Fatty Acid
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

UTM-25 Equipamento hidráulico de 25 kN
Vv Volume de vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo Geral	16
2.2	Objetivos Específicos	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1	Revestimentos asfálticos	17
3.2	Defeitos dos revestimentos asfálticos.....	18
3.3	Misturas asfálticas recicladas	19
3.4	Borra do óleo de soja e ácido graxo da borra do óleo de soja	20
3.5	Agentes rejuvenecedores.....	21
3.6	Custos de produção de misturas asfálticas.....	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1	Materiais	24
4.1.1	<i>Agregados naturais</i>	24
4.1.2	<i>Rap</i>	25
4.1.3	<i>Ácido graxo proveniente da borra do óleo de soja</i>	28
4.1.4	<i>Ligante asfáltico</i>	31
4.2	Métodos experimentais	32
4.2.1	<i>Alteração do ligante asfáltico</i>	32
4.2.2	<i>Dosagem da mistura asfáltica de parâmetro</i>	33
4.2.3	<i>Dosagem da mistura asfáltica reciclada</i>	35
4.2.4	<i>Ensaio mecânicos da mistura asfáltica de parâmetro e reciclada</i>	37
4.2.4.1	<i>Resistência à tração</i>	37
4.2.4.2	<i>Dano por umidade induzida (Lottman)</i>	38
4.2.4.3	<i>Módulo de resiliência (MR)</i>	39
4.2.4.4	<i>Resistência à fadiga</i>	40
4.3	Análise de custos	41
4.4	Teste t de Student	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1	Avaliação de desempenho mecânico das misturas	45
5.1.1	<i>Resistência à tração por compressão diâmetral (RT)</i>	45
5.1.2	<i>Dano por umidade induzida (LOTTMAN)</i>	47

5.1.3	<i>Módulo de resiliência (MR)</i>	49
5.1.4	<i>Fadiga por compressão diâmetral</i>	51
5.2	Análise de custo de produção	53
5.3	Análise estatística	55
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS .	59
6.1	Considerações finais	59
6.2	Sugestões para pesquisas futuras	60
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

Em face ao cenário atual, o pavimento flexível com camada de revestimento asfáltico, no país, é concebido para uma projeção de duração entre 8 e 12 anos, ocorrendo manifestações frequentes de patologias como afundamentos, fissuras e buracos. Em países como os Estados Unidos, essa projeção é de 25 anos (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2017).

O pavimento flexível é o mais utilizado nas rodovias brasileiras e, portanto, torna-se indispensável compreender o comportamento do pavimento, devido às intempéries provocadas pelo clima tropical. A depender da condição estrutural da camada de revestimento asfáltico há necessidade de remoção da camada por meio de fresagem e construção de uma nova camada asfáltica.

Com a execução dos serviços de fresagem, geram-se resíduos de grande volume em que há a necessidade de um descarte adequado. O *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) possui um grande potencial para ser reciclado na concepção de novas misturas asfálticas, reciclando os agregados e o ligante asfáltico após o processo de envelhecimento das camadas asfálticas (TORRES *et al.*, 2020).

O RAP gera uma menor demanda de energia e de recursos naturais diminuindo o consumo de agregados virgens e evitando processos como perfuração, detonação e britagem, ocasionando em uma menor emissão de gases. Para que a área da pavimentação adentre na economia circular (ciência de práticas econômicas destinando a um melhor uso e maior independência de matérias-primas, priorizando insumos duráveis e renováveis é indispensável transformar e/ou reutilizar os resíduos oriundos das atividades de manutenção, conservação e reconstrução das camadas de revestimento asfáltico (CORREA *et al.*, 2020).

Altos teores de RAP, geralmente superiores a 30%, são limitados devido às características de elevada rigidez que o material representa. Com o propósito de reestabelecer parcialmente suas propriedades iniciais é admitido empregar um agente rejuvenescedor do tipo óleo vegetal em dosagem de mistura asfáltica (TORRES *et al.*, 2020).

Uma das principais áreas de interesse no campo da engenharia de pavimentos é a de biomateriais, em virtude dos recursos renováveis, preços mais baixos por serem produzidos *in loco*, ecologicamente corretos e menor consumo de energia em comparação com recursos de materiais petrolíferos (MAMAT *et al.*, 2015). A seleção

eficiente de óleos usados como agentes rejuvenescedores favorece a construção de pavimentos mais sustentáveis (MAMUN *et al.*, 2020).

De acordo com o estudo de Zhang *et al.* (2021), o óleo de soja apresenta amplo potencial na regeneração de ligantes asfálticos envelhecidos, especialmente ligantes asfálticos de longa duração e extremamente envelhecidos. O óleo de soja possui capacidade para criar uma estrutura de rede reticulada promovendo e melhorando a regeneração de ligantes asfálticos envelhecidos.

Segundo a pesquisa de Zeng *et al.* (2016), o óleo de mamona foi usado como modificador de propriedades físicas, químicas e morfológicas do ligante asfáltico e o uso de uma pequena quantidade de óleo de mamona recupera as propriedades físicas e viscoelásticas do ligante asfáltico em termos de ponto de amolecimento, índice de penetração e viscosidade.

Melo Neto (2022) em seu estudo analisou a utilização do ácido graxo da borra do óleo de soja (SSFA) como agente rejuvenecedor das misturas asfálticas recicladas com 40% de RAP em teores de 0, 3 e 5%. Como também avaliou a viabilidade técnica, econômica e ambiental quanto às características do material. Em decorrência aos ensaios, a mistura com 3% de SSFA demonstrou maior viabilidade ambiental, econômica e técnica. Desta forma, em vista à ausência de estudos mecânicos e econômicos de misturas asfálticas recicladas com maior teor de ácido graxo da borra do óleo de soja, faz-se necessária a investigação.

Diante desse contexto, este trabalho buscou verificar o comportamento mecânico de uma mistura asfáltica reciclada com maior teor de ácido graxo da borra do óleo de soja, aplicando o teor específico de 6%.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade técnica e econômica de uma mistura asfáltica reciclada com o ácido graxo da borra do óleo de soja no teor de 6%.

2.2 Objetivos Específicos

- Investigar o desempenho mecânico da mistura asfáltica reciclada com ácido graxo da borra do óleo de soja;
- Avaliar o custo de produção da mistura asfáltica reciclada com o ácido graxo da borra do óleo de soja.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O tema abordado nesse tópico traz consigo um panorama conceitual sobre a definição e uso de revestimentos asfálticos e os principais defeitos apresentados ao longo de sua vida útil; misturas asfálticas recicladas e a necessidade de sua utilização; agentes rejuvenescedores, principais tipos e os mais utilizados com foco nos óleos vegetais e residuais. Por fim, também é abordado sobre os custos de produção de misturas asfálticas.

3.1 Revestimentos asfálticos

Os pavimentos consistem em várias camadas, sendo o revestimento a camada responsável por suportar a carga dos veículos e enfrentar os efeitos do clima de forma mais direta. Por essa razão, é essencial que essa camada seja o mais impermeável possível e resistente aos esforços resultantes do contato entre os pneus e o pavimento em movimento, que variam de acordo com a carga e a velocidade dos veículos (BERNUCCI *et al.*, 2022).

O predominante tipo de pavimento utilizado nas rodovias brasileiras é o pavimento flexível, que consiste em um revestimento asfáltico de caráter betuminoso. O asfalto trabalhado termicamente, o concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ), é o revestimento flexível mais utilizado em projetos de pavimentação em todo o mundo (PEREIRA, 2014).

De acordo com Sobreiro (2014), o ligante asfáltico na mistura asfáltica tem como principais funções impermeabilização e aglutinação. A primeira garante o impedimento da infiltração de água e a última proporciona capacidade de resistência à ação mecânica.

O fenômeno de envelhecimento de ligantes asfálticos, segundo Silva (2020), é ocasionado pela oxidação e perda de compostos voláteis em sua composição, desenvolvido sobretudo nos estágios de execução, armazenamento e triagem.

O envelhecimento dos ligantes em misturas asfálticas ocorre devido à influência da temperatura, do ar, da luz solar, da chuva e do tempo, o que leva ao aumento da consistência asfáltica e ao aumento da dureza da camada asfáltica. Este "endurecimento" do ligante asfáltico, aliado à ação do trânsito, provoca fissuras no pavimento e degradação acelerada. No entanto, essas misturas asfálticas

envelhecidas podem ser recicladas adicionando aditivos químicos chamados rejuvenescedores, que são projetados para substituir aromáticos e resinas, restaurando assim as propriedades originais do ligante asfáltico (SILVA; FARIAS, 2018).

3.2 Defeitos dos revestimentos asfálticos

Segundo Centofante (2018), os mecanismos de degradação dos pavimentos flexíveis, principalmente a fissuração por fadiga e a deformação permanente excessiva, são decorrentes dos efeitos climáticos e do tráfego, e dependem principalmente das tensões e deformações que atuam na estrutura.

Conforme Bonfim (1995), a influência da temperatura, oxigênio, luz solar, chuva e clima aumenta a consistência do ligante asfáltico, promovendo o envelhecimento. Assim, a camada asfáltica torna-se mais rígida. Esta rigidez está relacionada ao teor de asfaltenos do concreto asfáltico que aumenta relativamente, enquanto o teor de resina e óleo aromático diminuem.

No Brasil, a maioria dos problemas que ocorrem nos revestimentos asfálticos são decorrentes da falta de manutenção, e um exemplo típico é a formação de trincas sem o devido reparo e a presença de água que começa a afetar a estrutura do pavimento. Assim, há a formação de painéis no mesmo, com o tempo a ausência de reparos afeta a capacidade de carga da via (MELO NETO, 2022). O termo painel refere-se a uma patologia onde é formada uma cavidade, esta é provocada devido a evolução de patologias primárias tais como desgaste, fendas e afundamentos ocasionados pela ausência de aderência entre as camadas do pavimento (PINTO, 2003).

De acordo com Nunes (2009), a fissuração por fadiga é um dos principais defeitos do pavimento flexível e origina-se do carregamento repetido do tráfego e cria tensão de tração na parte inferior do revestimento, provocando o aparecimento de microfissuras no estágio inicial, que depois evoluem para trincas e eventualmente levam à falha mecânica.

Com o presente objetivo de aumentar a longevidade do pavimento, faz-se necessário evitar a deformação permanente, que segundo Guimarães (2022), é ocasionada devido a repetitivas deformações ocasionadas pela ação da carga imposta pelo tráfego e, sob menor influência, pela densificação da camada,

respondendo por mais de 80% dos danos iniciais ao pavimento asfáltico.

3.3 Misturas asfálticas recicladas

As misturas asfálticas são sintetizadas como um material sólido elástico, que possuem a característica de viscoelasticidade do ligante asfáltico inserido na mesma, o que as tornam vulneráveis às alternâncias de temperatura e de frequente imposições de carga. Em muitos países, as tecnologias de reciclagem são utilizadas como forma de agregar valor ao desempenho e manutenção da vida útil do pavimento, pois essas tecnologias representam alternativas viáveis quanto ao aspecto sustentável, técnico e econômico (CENTOFANTE *et al.*, 2018).

O procedimento de reciclagem de pavimentos existe desde 1970, alocado ao crescimento tecnológico e com o decorrente aumento do material fresado, desencadeando a necessidade de obter soluções para reuso desse material (PRADYUMNA *et al.*, 2013).

Conforme Miranda-Argüello (2019), o pavimento asfáltico reciclado provém de um pavimento que alcançou o fim de sua vida útil com características que possibilitam o seu reuso. Diante do exposto, a grande finalidade do uso está na diminuição de impactos ambientais, o que reduz a extração de novos agregados, apresentando economia na extração de agregados virgens e na quantidade utilizada de ligante asfáltico para a produção do material final que é a mistura asfáltica.

O pavimento uma vez removido, seja por processos de recapeamento, reabilitação ou reconstrução, é denominado *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). O uso do RAP é uma escolha favorável ao ambiente em razão da economia de energia, diminuição de entulhos gerados e redução de despesas com o transporte de novos agregados, o que gera uma otimização dos recursos naturais (COPELAND *et al.*, 2011).

De acordo com Mirhosseini (2019), o aumento dos preços do petróleo e as restrições de recursos naturais e questões ambientais, incitaram pesquisadores para encontrar alternativas e utilizar recursos utilizáveis. No caso de estradas asfaltadas, o uso do RAP aumentou consideravelmente nos últimos dez anos. Segundo Silva (2011), a reutilização de materiais e sua aplicabilidade estão sujeitas à disponibilidade do material a ser utilizado e condições de restauração do pavimento.

As misturas asfálticas recicladas são produzidas com material fresado pelo

método de mistura á quente e atendem às especificações de durabilidade especificadas pela norma. Como alternativa para otimizar os efeitos positivos do uso do RAP e reduzir seus efeitos negativos, agentes rejuvenescedores podem ser utilizados para restaurar as propriedades básicas dos ligantes asfálticos envelhecidos (GENNESSEAUX *et al.*, 2015).

3.4 Borra do óleo de soja e ácido graxo da borra do óleo de soja

No panorama das pesquisas de misturas asfálticas, a inserção do óleo de soja como modificante se configura em uma possível aplicação ecologicamente correta deste item em substituição parcial ao óleo à base de petróleo considerado como recurso não renovável (SILVÉRIO, 2017).

Durante o refino de óleos vegetais são gerados três subprodutos principais: as gomas resultantes do processo de degomagem, as borras oriundas da etapa de neutralização do óleo bruto e o condensado proveniente da desodorização. No refino, durante a etapa de neutralização do óleo de soja bruto, sais de sódio de ácidos graxos (sabões) são formados por meio da reação de neutralização dos ácidos graxos livres presentes no óleo. A borra é basicamente constituída de água, sais de sódio de ácidos graxos, triglicerídeos, fosfolipídios, matéria insaponificável e produtos de degradação do óleo (FRÉ, 2009).

Fré (2009) aponta que a borra é o principal subproduto da indústria de óleo de soja. Esse resíduo possui alto conteúdo de ácidos graxos e assim, apresenta-se como matéria-prima para a obtenção de ácidos graxos livres, os quais podem ser utilizados como agentes de tratamento de minérios e matéria-prima para a produção de biodiesel, graxas e fertilizantes.

A borra de soja apresenta certa peculiaridade. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na Norma Brasileira (NBR) 10004, os resíduos sólidos são distribuídos em três classes, sendo: Classe I, resíduo perigoso; Classe II, resíduo não inerte e Classe III, resíduo inerte (ABNT, 2004). A borra de soja é considerada de Classe I, pois segundo Callegaro (2011) em função das suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podem apresentar risco à saúde pública, provocando ou acentuando, de forma significativa, um aumento da mortalidade ou incidência de doenças e/ou apresentam efeitos adversos ao ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma inadequada. As características que conferem periculosidade a um

resíduo são: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

A estas características soma-se a viabilidade econômica desse resíduo, que é determinado diretamente pelo conteúdo de ácidos graxos totais. O óleo ácido de soja, obtido a partir da borra de neutralização, pode ser usado como coletor de apatita, matéria-prima para a produção de biodiesel e como parte constituinte de rações animais (ARAÚJO, 2016).

No caso dos ácidos graxos resultantes da acidulação da borra podem ser utilizados no tratamento de minérios, que consiste basicamente de uma série de processos que têm em vista a separação das partículas minerais valiosas dos minerais e ganga (partículas de minério que não são de interesse) e a obtenção final de um produto concentrado com um teor elevado e adequado do mineral desejado. Eles são capazes de alterar a superfície das espécies minerais, revestindo seletivamente a superfície mineral de interesse tornando-a hidrofóbica (ARAÚJO *et al.*, 2016).

3.5 Agentes rejuvenescedores

Os agentes rejuvenescedores tendem a melhorar significativamente o desempenho de misturas asfálticas contra fissuração e fadiga (MOGAWER *et al.*, 2018). Existem diversos agentes rejuvenescedores no mercado, mas com o aumento da busca por tecnologias mais sustentáveis, pesquisas vêm sendo realizadas para modificar ligantes asfálticos utilizando resíduos de óleos vegetais (TORRES *et al.*, 2022).

Segundo Torres *et al.* (2020), o óleo vegetal residual, como agente rejuvenescedor, apresenta uma boa tendência à redução da viscosidade dos ligantes em razão de sua conveniente estabilidade oxidativa, apresentando uma boa viabilidade econômica e melhora na trabalhabilidade da mistura utilizada.

Em um estudo desempenhado por Yang (2013), foram utilizados três tipos diferentes de bio-óleo, sendo estes, bio-óleo não tratado, bio-óleo modificado por polímero e por fim, bio-óleo tratado, para formação de ligantes biológicos. O desempenho de alta temperatura desses ligantes foram avaliados e os resultados mostraram competência otimizando a vida de fadiga das misturas em diferentes níveis de tensão testados.

3.6 Custos de produção de misturas asfálticas

De acordo com o estudo feito por Veeraragavan (2016), utilizando preços de materiais em Maine (EUA), foram obtidas economias de custos significativas usando altos teores de RAP (>30%) e agentes recicladores. Ao considerar o preço do ligante virgem, agregado virgem, RAP e agentes recicláveis; foi possível constatar uma economia de custo total de 40%, aumentando o teor de RAP de 0 a 50% (usando agente reciclador de óleo vegetal residual).

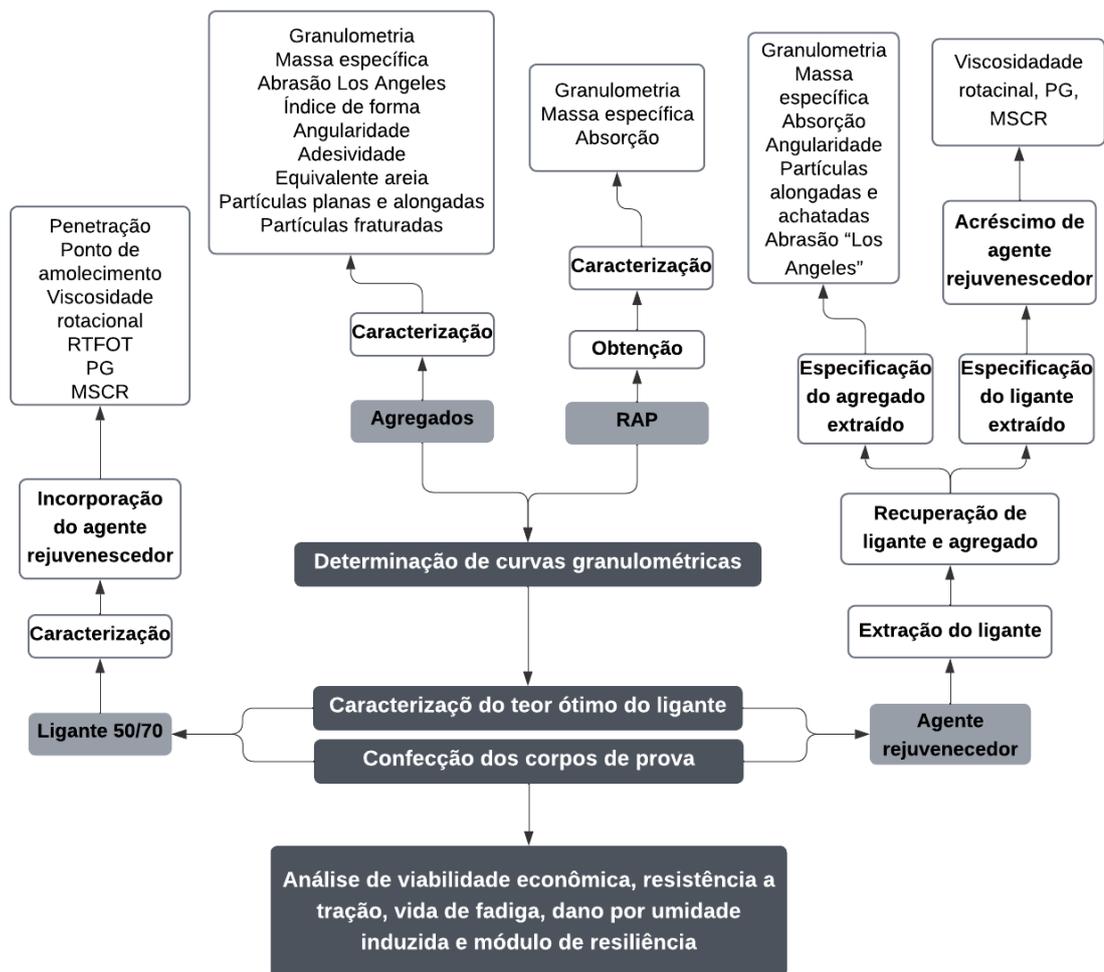
Segundo Martin (2016), diante de sua investigação econômica a respeito de preços de materiais no Texas, EUA, foram identificadas economias de custos associadas ao acréscimo do teor de RAP em misturas asfálticas recicladas. No que diz respeito ao preço de ligantes virgens, agregados virgens, RAP, agentes de reciclagem, acrescido com informações de custo em termos de logística, a economia associada ao aumento do teor de RAP de 20% para 40% (usando agentes recicladores) foi de 15% do custo de produção.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do presente trabalho, de acordo com os objetivos anteriormente elencados.

Os procedimentos descritos neste trabalho foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), próprio da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Observa-se no Fluxograma da Figura 1 as etapas de realização desta pesquisa.

Figura 1 - Fluxograma das etapas de realização desta pesquisa



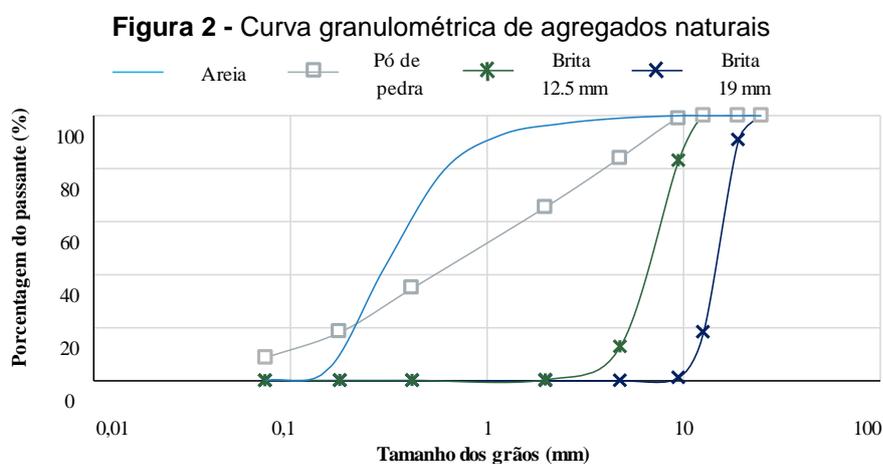
Fonte: Dados da pesquisa.

4.1 Materiais

4.1.1 Agregados naturais

Os agregados miúdos utilizados no estudo foram areia e pó de pedra. Os agregados graúdos que se destinaram às misturas asfálticas foram britas graníticas de 12,5mm e 19mm. Para compor a utilização como filer (material de enchimento) foi utilizada a cal hidratada dolomítica (CH-I). Os procedimentos utilizados para a caracterização de dos agregados naturais foram: Massa específica; Absorção; Índice de forma; Equivalente areia; Abrasão Los Angeles; Análise granulométrica; Partículas alongadas e achatadas; Adesividade de agregado; Partículas fraturadas; e Angularidade.

A partir da análise da granulometria dos agregados naturais pode-se traçar a curva granulométrica como é demonstrado na Figura 2. Analisando a distribuição dos grãos, constata-se que os agregados graúdos e o pó de pedra apresentam graduação uniforme e que a areia manifesta graduação densa.



Fonte: Autora (2023).

A Tabela 1 dedica-se a explanação dos resultados de ensaios de caracterização de agregados naturais de acordo com as normas específicas.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de caracterização de agregados naturais

Ensaio	Norma	Especificação	Resultados			
			Brita 19 mm	Brita 12.5 mm	Pó de pedra	Areia
Massa específica real - (g/cm ³)	ASTM (C127-2016)	*	2,759	2,625	2,542	2,665
Massa específica aparente - (g/cm ³)	ASTM (C127-2016)	*	2,732	2,612	2,43	2,607
Absorção - (%)	ASTM (C127-2016)	≤ 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

* = Não aplicável.

Fonte: Autora (2023).

Os limites apresentados estão em concordância com a coluna de especificações referente às normas apresentadas na Tabela 1 e corroboram com a literatura de trabalhos que utilizaram os mesmos tipos de agregados como o de Melo Neto (2022), Torres *et al.* (2020) e Amorim (2022).

4.1.2 Rap

O equipamento utilizado para extração do ligante presente no RAP foi o Rotarex, neste método se determina a quantidade de ligante de misturas betuminosas, conforme as recomendações da ASTM D2172:2017. A metodologia empregada para extração seguiu a de Melo Neto *et al.* (2022) e foi utilizado o solvente tricloroetileno conforme norma (ASTM D2172 - 2017; DNIT 158 – 2011 ME).

As amostras foram submetidas à temperatura de 110°C por 1 hora, em seguida foram destorroadas e pesadas em prato de centrífuga. Seguidamente foi adicionado

solvente para início de centrifugação. Após passar pela centrífuga foi feita adição de 200ml de diluente, em etapas proporcionais e equivalentes, até que o solvente se mostrasse translúcido como estabelecido em norma. Ao final do procedimento, a proporção de ligante asfáltico que estava contido no RAP correspondeu a 5,49%.

Assim que o ligante asfáltico envelhecido (oxidado) é recuperado por meio de evaporador rotativo a 60°C de temperatura por aproximadamente 2 horas e vácuo de 0.035 mmHg. Posteriormente ao processo de recuperação do ligante, este foi disposto em estufa à temperatura de 70°C durante 6 horas e por mais 2 horas a 85°C, por fim foi submetido a 100°C por 2 horas. Conforme o processo foi realizado, a diferença na temperatura se fez necessária para evaporação do solvente, pois com menos solvente aderido mais viscosa se apresentou a amostra e conseqüentemente mais difícil a extração do resíduo de solvente.

A caracterização do ligante ocorreu mediante ensaios de viscosidade rotacional, ponto de amolecimento, penetração, *performance grade* (PG) e por fim, *Fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas* (MSCR), conforme resultados listados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados da caracterização do ligante asfáltico

Normas	Ensaio	Resultados	
ASTM D5M (2020)	Penetração 0.1 mm (100g, 5s a 25°C)	29	
ASTM D2872 (2019)	Ponto de amolecimento (°C)	68	
ASTM D4402 (2015)	Velocidade Rotacional (cP)	135°C	16476
		142°C	9520
		150°C	6676
		165°C	2483
		177°C	1215
ASTM D6373 (2021)	Temperatura mais alta da performance grade (°C)	82	
ASTM D7405 (2020)	Jnr 0.1(kPa ⁻¹)	1.82	
	Jnr 3.2(kPa ⁻¹)	2.30	
	Jnr diff (%)	26.57	
	$R_{0.1}$ Recuperação média a 0.1 kPa (%)	7.03	
	$R_{3.2}$ Recuperação média a 3.2 kPa (%)	2.5	

Fonte: Autora (2023).

A performance de grade de 82°C foi a maior temperatura apresentada pelo ligante asfáltico. Os valores de viscosidade e penetração apresentam conformidade com a literatura, diante do ligante contido no material reciclado e do grau de rigidez elevado.

Devido à elevada rigidez do RAP, se faz necessário o uso de agente rejuvenescedor aderido ao ligante asfáltico como um modificador redutor de viscosidade, com propósito de aperfeiçoar e favorecer as misturas asfálticas frente ao defeito de trincamento ocasionado por fadiga.

Para caracterização física e reológica de teor ideal de RAP para misturas recicladas, foram utilizados ensaios habitualmente empregados para agregados naturais, como o White RAP (RAP sem o ligante envelhecido aderido aos agregados) e Black RAP (RAP com o ligante envelhecido aderido aos agregados). Os resultados da caracterização dos agregados RAP, estão dispostos na Tabela 3.

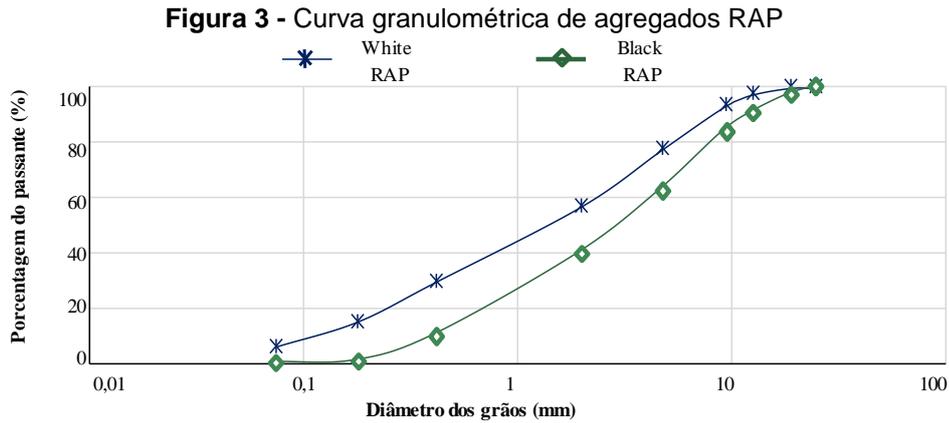
Tabela 3 - Resultados da caracterização dos agregados RAP

Norma	Ensaio	Especificação	Resultados	
			Black RAP	White RAP
ASTM C127 (2020)	Massa específica real (g/cm ³)	*	2.464	2.466
ASTM C127 (2020)	Massa específica aparente (g/cm ³)	*	2.374	2.378
ASTM C127 (2020)	Absorção (%)	≤ 2	0.5	0.89
ASTM C2419 (2014)	Equivalente Areia (%)	≥ 55	86.59	68.56
ASTM C4791 (2019)	Partículas alongadas e achatadas (%)	≤ 10	*	9.34
ASTM C1252 (2017)	Angularidade (%)	≥ 45	52.62	45.43

* = Não aplicável.

Fonte: Autora (2023).

Após a caracterização, foi possível a determinação da curva granulométrica de agregados RAP, conforme a Figura 3.



Fonte: Autora (2023).

Os agregados oriundos do RAP, apresentam granulometria uniforme e os parâmetros demonstrados estão de acordo com os limites de especificação.

4.1.3 Ácido graxo proveniente da borra do óleo de soja

Na pesquisa em questão foi utilizado como agente rejuvenescedor o ácido graxo da borra do óleo de soja, que é o principal subproduto do refino do óleo de soja, formado no decorrer da etapa de neutralização do refino do óleo bruto.

Figura 4 - Borra do óleo de soja *in natura*



Fonte: Autora (2023).

A borra foi disponibilizada sem os dados característicos pela empresa IMCOPA, situada na região Sul do país no estado do Paraná. Devido à ausência

desses dados foi necessário realizar a caracterização do material de acordo com as normas da *American Oil Chemists Society* (AOCS), conforme demonstrado na Tabela 4.

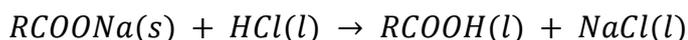
Tabela 4 - Resultados dos ensaios de caracterização da borra do óleo de soja

Normas	Ensaio	Resultados
AOCS Ca 5a-40 (2017)	Ácidos graxos livres em ácido oleico (%)	0.68
AOCS G 3-53 (2017)	Teor de ácidos graxos totais (%)	41.59
AOCS G 3-53 (2017)	Teor de ácidos graxos oxidados (%)	1.22
AOCS Ca 6a-40 (2017)	Teor de matéria insaponificável (%)	0.87
AOCS G5-40 (2017)	Teor de óleo neutro (%)	12.44
AOCS G 7-56 (2017)	pH a 25°C	9.96
AOCS Ca 2c-25 (2017)	Teor de umidade e voláteis (%)	41.85

Fonte: Autora (2023).

O teor de ácidos graxos obtidos condiz com o estimado por Swen (1982), ocorrendo dentro da faixa de 35% a 50%, sendo o resultado obtido de 41,59%. O teor de umidade encontrado na borra foi elevado, o que pode influenciar de forma negativa os resultados perante o ligante asfáltico após o procedimento de modificação. Onde o alto teor de umidade e voláteis foi superior a 40%. Os valores coletados têm como propósito averiguar a qualidade da borra do óleo de soja.

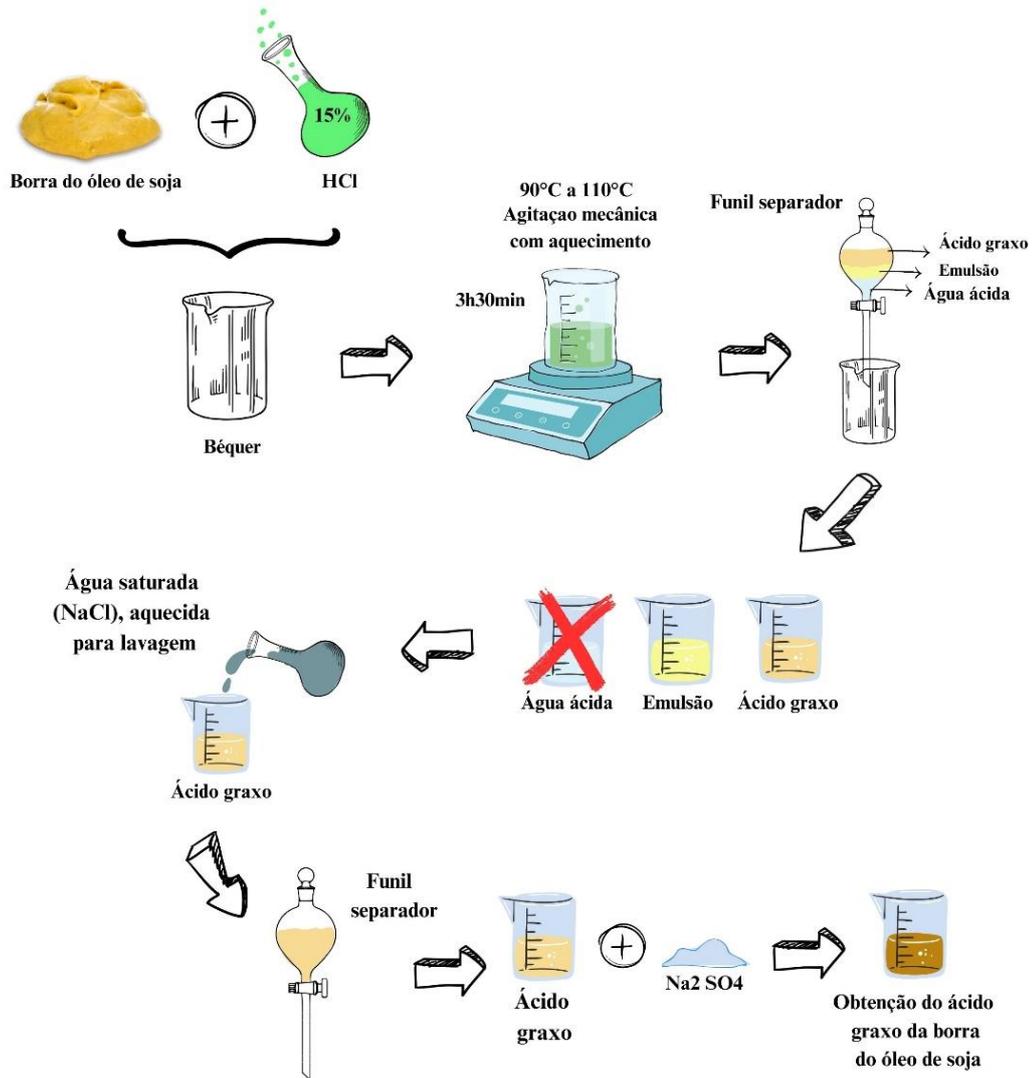
O processo de acidulação realizado ocorreu conforme os procedimentos apresentados na pesquisa de Melo Neto *et al.* (2022). Foram adicionados 200g de borra, 48 mL de (HCl) – Ácido clorídrico, 245 mL de (H₂O) – Água e 4 gotas de indicador de Ph (MO) – Alaranjado de metila. A reação foi mantida sob aquecimento de 90° a 110°C em um agitador magnético com calefação Fisatom 752A durante 3h30min, com objetivo de converter sabões e ácidos graxos, conforme a reação apresentada abaixo:



Após ocorrer a reação, a água e o óleo são separados por decantação. Em seguida, é atingida uma mistura heterogênea, onde é possível observar o aparecimento de três fases, sendo elas: Ácido graxo (camada superior), emulsão oleosa (camada intermediária) e água ácida (camada inferior). A camada identificada

como água ácida é descartada e a fase de emulsão oleosa foi lavada com 25% a 50% de água saturada adicionada de cloreto de sódio, sendo aquecida e descartada mais uma vez, obtendo o ácido graxo da borra do óleo de soja. A Figura 5 demonstra as etapas do processo de acidulação da borra do óleo de soja.

Figura 5 - Processo de acidulação da borra do óleo de soja



Fonte: Autora (2023).

Foram realizados ensaios de caracterização do ácido graxo da borra do óleo de soja, que apresentou um teor de umidade de 2,447% e um teor de ácidos graxos totais de 90%. O que condiz com a estimativa de Swen (1982), que estima valores entre 85% a 95% de ácidos graxos totais e também corrobora para os valores de teor de umidade e ácidos graxos totais obtidos no estudo de Melo Neto *et al.* (2022).

4.1.4 Ligante asfáltico

O ligante utilizado nas misturas recicladas se classifica em penetração 50/70 (AB), sendo de utilização comum, frequente e habitual no Nordeste do Brasil.

Foi produzida uma mistura asfáltica apenas com materiais virgens para fins de comparação. As amostras de ligante asfáltico virgem e envelhecido foram submetidos aos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, PG e MSCR, para caracterização do ligante com estufa de filme fino rotativa (*Rolling Thin Oven Test*). A Tabela 5 demonstra os resultados obtidos nos ensaios.

Tabela 5 - Caracterização do ligante asfáltico virgem (puro)

Normas	Ensaios	Resultados AB
ASTM D5/D5M (2020)	Penetração 0.1 mm (100g, 5s a 25°C)	58
ASTM D36/D36M-14 (2020)	Ponto de amolecimento (°C)	52
ASTM D4402/D4402M (2015)	Velocidade Rotacional (cP)	135°C 401
		150°C 198
		177°C 72.75
ASTM D6373 (2021) ASTM D2872 (2019)	Temperatura mais alta da performance grade (°C)	64
ASTM D4402/D4402M (2015)	Velocidade Rotacional (cP)	135°C 557.5
		150°C 269
		177°C 94
ASTM D6373 (2021)	Temperatura mais alta da performance grade (°C)	64
ASTM D7405 (2020)	Jnr 0.1(kPa ⁻¹)	3.4
	Jnr 3.2(kPa ⁻¹)	3.83
	$R_{0.1}$ Recuperação média a 0.1 kPa (%)	5.03
	$R_{3.2}$ Recuperação média a 3.2 kPa (%)	0.37

Fonte: Autora (2023).

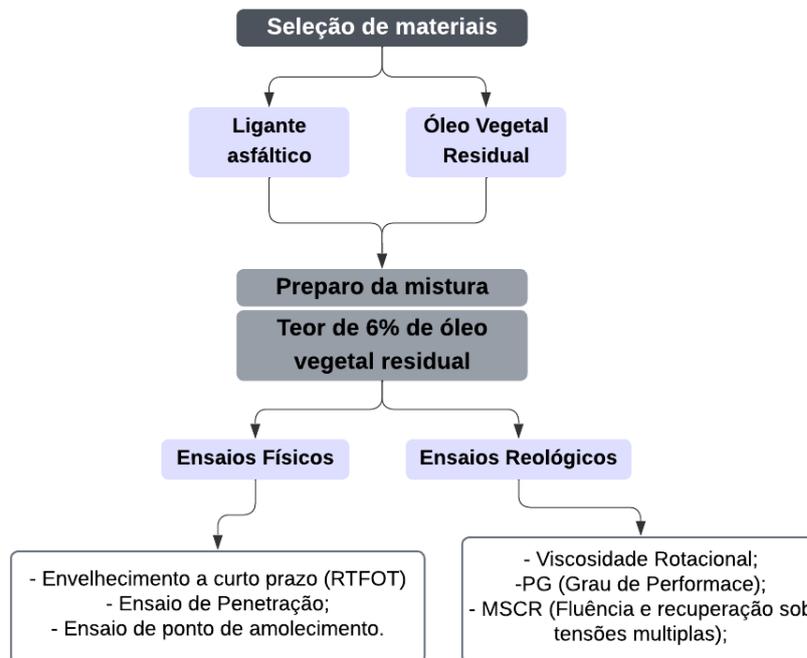
O ligante asfáltico foi modificado para fins de investigação comportamental física e reológica, o teor de incorporação do óleo vegetal residual foi definido em 6%, baseando-se na pesquisa desenvolvida por Melo Neto (2022) que trabalhou com ácido graxo da borra do óleo de soja em teores de 0%, 3% e 5% e encontrou resultados satisfatórios com esses teores, com o objetivo de garantir os melhores resultados quanto às propriedades reológicas e a redução da temperatura de trabalhabilidade.

Testaram-se os efeitos do uso de maior teor de ácido graxo da borra do óleo de soja (AGBS).

4.2 Métodos experimentais

A execução experimental da pesquisa se dividiu em duas etapas, sendo a primeira de mistura e caracterização física do ligante puro e modificado, e na segunda foi realizada a caracterização reológica. O fluxograma da Figura 6 apresenta a sequência de atividades experimentais da pesquisa.

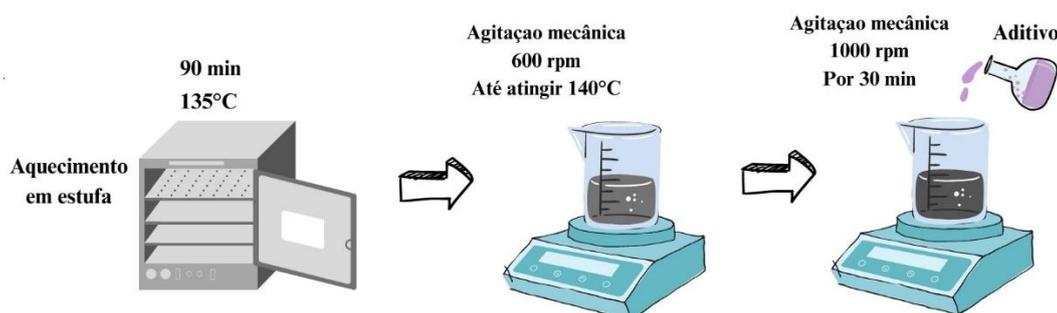
Figura 6 - Fluxograma da sequência de atividades



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.1 Alteração do ligante asfáltico

A partir do teor de incorporação do óleo vegetal residual definido em 6%, a modificação do ligante pode ser realizada com auxílio de um agitador mecânico FISATOM 722D. As etapas da modificação, segue conforme Figura 7.

Figura 7 - Processo de modificação do ligante asfáltico

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Inicialmente o ligante foi aquecido a 135°C em estufa por 90 minutos, com o propósito de reduzir a viscosidade para favorecer a mistura de forma homogênea. Posteriormente a mistura foi colocada em um béquer e colocado em um agitador mecânico a 600 rpm, até atingir a temperatura de 140°C. Em seguida, foi adicionado um aditivo, proporcional de acordo para a quantidade de ligante puro, imediatamente a rotação foi colocada em 1000 rpm e a mistura ocorreu por 30 minutos. Observou-se uma homogeneidade da amostra de ligante após a modificação por agitação.

4.2.2 Dosagem da mistura asfáltica de parâmetro

A metodologia SUPERPAVE, normatizada pela ASTM D6925: 2015 foi utilizada para dosagem da mistura asfáltica a quente. Inicialmente foram realizadas combinações com agregados de granulometrias diferentes para satisfazer os requisitos da metodologia citada e que se enquadre nos limites estabelecidos do DNIT 031/2006 – ES, faixa C. Os agregados escolhidos foram listados na Tabela 6, sendo nomeadas como “curva superior”, “curva intermediária” e “curva inferior”.

Tabela 6 - Composição da granulometria de misturas asfálticas de parâmetro

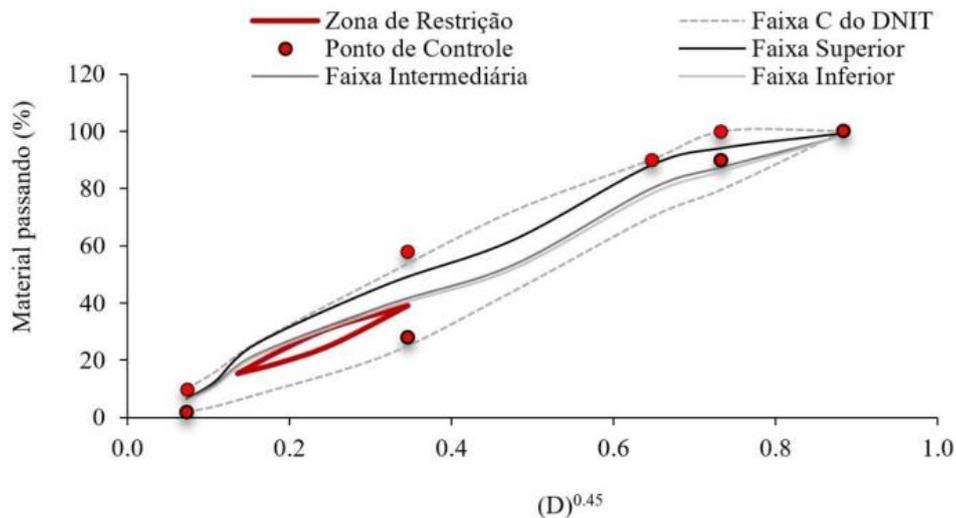
	Brita 19.0 (mm)	Brita 12.5 (mm)	Areia	Pó de pedra	Cal
Inferior (%)	19	30	4	45	2
Intermediária (%)	15	27	5	51	2
Superior (%)	7	25	10	56	2

Fonte: Autora (2023).

O SUPERPAVE, possui uma zona de restrição como representado no gráfico

na Figura 8, na qual as curvas granulométricas não devem ultrapassar, caso alguma curva venha a exceder, designa baixa resistência. Os pontos de controle representados em círculos vermelhos, são regiões onde as curvas precisam passar para que garantam uma boa resistência das misturas asfálticas.

Figura 8 - Gráfico contendo as curvas granulométricas (superior, intermediária e inferior), pontos de controle, zona de restrição e faixa C



Fonte: Autora (2023).

A fim de investigar qual curva melhor condiz com a metodologia SUPERPAVE, foram produzidas misturas asfálticas para as três curvas granulométricas e foram desenvolvidos corpos de prova, com teor de ligante virgem em 5% em peso completo da mistura, foram desenvolvidos dois corpos de prova para cada mistura asfáltica e para cada um dos esforços de compactação. As compactações foram feitas no Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS), seguindo as especificações citadas na norma ASTM D6925:2015. Para o tráfego médio a alto, os esforços são sequencialmente 8 giros, 100 giros e 160 giros. Respectivamente $N_{inicial}$, $N_{projeto}$ e $N_{máximo}$. O teor de ligante analisado com base no $N_{projeto}$ foi selecionado para projeto, para avaliação da compactação de misturas foram analisados $N_{inicial}$ e $N_{máximo}$. Os resultados de parâmetros calculados para as três composições granulométricas estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros volumétricos das misturas analisadas com teor de ligante inicial

Composição Granulométrica	Teor de ligante (%)	Gmm (%) - Ninicial	Gmm (%) - Nprojeto	Gmm (%) - Nmáximo	VAM (%)	Vv (%)
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: Autora (2023).

A partir dos resultados obtidos e comparando cada curva granulométrica com os critérios SUPERPAVE, pode-se concluir que a composição da curva intermediária correspondeu aos requisitos de dosagem e apresentou 4% de volume de vazios (Vv). Em seguida foram realizados testes de teores de ligantes para determinação do teor ótimo do ligante de acordo com os critérios SUPERPAVE. Para esse propósito, dois corpos de prova foram moldados para cada teor de ligante (4,25%, 4.75%, 5.00%, 5.25%, 5.75%), a fim de verificar se os teores apresentam os parâmetros dentro dos critérios de especificação. Os resultados da relação ligante-vazios (RBV), relação pó-ligante asfáltico (P/A) e parâmetros volumétricos para teores de ligantes estão demonstrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros volumétricos das misturas de projeto analisadas

Teor de ligante (%)	Gmm (%) - Nprojeto	VAM (%)	Vv (%)	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
Critério SUPERPAVE	96%	≥13%	4%	65-75	0.6 - 1.2

Fonte: Autora (2023).

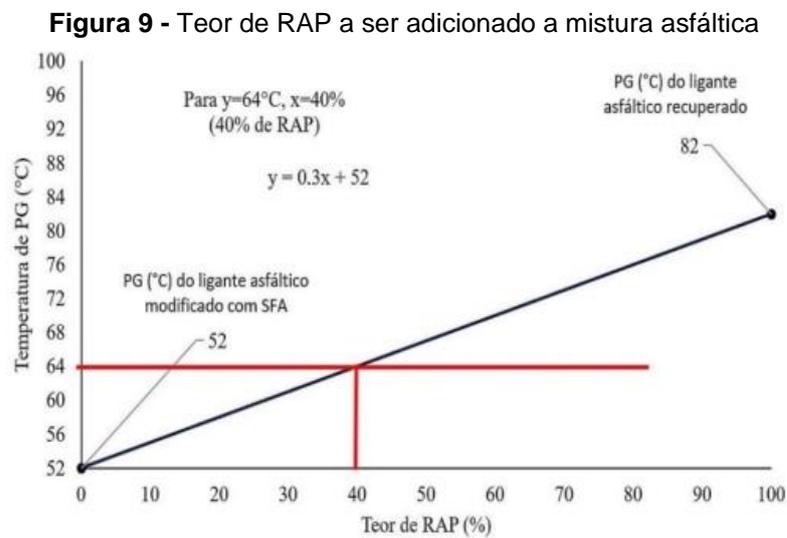
O teor escolhido para produção de mistura asfáltica de parâmetro foi de 4.75%, em razão de apresentar melhores resultados quando comparado ao critério SUPERPAVE.

4.2.3 Dosagem da mistura asfáltica reciclada

Foi utilizado o método *Blending Chart* (método B) a fim de estabelecer o teor

ideal de RAP para dosagem utilizada na mistura reciclada. O ligante é selecionado considerando o clima de nível de tráfego para o projeto em específico no qual a mistura será utilizada.

Para compensar a adição de material fresado o ligante virgem pode ser modificado. Para elaboração do gráfico utilizou-se *Performance grade* (PG) normatizada pela ASTM D6373: 2021, no qual foram aplicados os dados do ligante recuperado (82°C) e PG do ligante modificado com teor de 6% de ácido graxo da bora do óleo de soja (52°C), conforme é mostrado na Figura 9.



Fonte: Autora (2023).

A partir do gráfico pode-se concluir que o teor de RAP a ser utilizado na mistura asfáltica reciclada é de 40% para uma temperatura de PG de 64°C. A dosagem foi realizada de tal forma que a distribuição granulométrica se enquadrasse na curva intermediária, da mesma forma que a mistura asfáltica de controle. O teor de ligante envelhecido foi de 5.49%, assim, para o percentual de 40% estão presentes 2,2 % de ligante asfáltico envelhecido. O ligante asfáltico interage de forma parcial e se faz necessário uma interação de 60% a 100% para resultados satisfatórios de desempenho mecânico. Desta forma, para verificar o que melhor se enquadra nos critérios SUPERPAVE, foram testados os teores de: 2.50%, 2.75%, 3.00%, 3.25%, 3.75% e 4.00%. O teor determinado para o ligante virgem modificado foi de 3.5%, visto que foi o que melhor se enquadrou nos critérios de especificação de SUPERPAVE.

4.2.4 Ensaios mecânicos da mistura asfáltica de parâmetro e reciclada

A análises comparativas das misturas em questão foram realizadas por meio de ensaios de resistência à tração, dano por umidade induzida, módulo de resiliência, resistência à fadiga e resistência à deformação permanente. Os ensaios oferecem uma análise ampla das propriedades mecânicas das misturas asfálticas, também como verificar o dano ocasionado devido à umidade em uma mistura asfáltica com base na perda de uma característica mecânica, entender a resposta do material diante de uma carga aplicada em pulsos de duração curta, limites de tensão e de tempo de uso, além de deformações acumuladas ao longo de ciclos de tensões. A relevância da investigação está nos danos em misturas recicladas por efeito de fadiga, umidade e fratura.

4.2.4.1 Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração de misturas asfálticas por compressão diametral (RT) é normatizado pelo DNIT 136:2018 e tem como objetivo avaliar o desempenho e qualidade de misturas asfálticas. O ensaio utiliza amostras cilíndricas compactadas de misturas asfálticas com a finalidade de medir a resistência à tração indireta dessas misturas, caracterizar o comportamento mecânico, verificar conformidade com especificações técnicas e por fim, permite comparar misturas asfálticas. Sendo essas informações de elevada relevância para projeção e construção de pavimentos duráveis e seguros. Para realização do teste, duas forças opostas diametralmente foram aplicadas através de frisos metálicos gerando tensões de tração uniformes em um corpo de prova cilíndrico com diâmetro de 100mm e altura de 65mm. Foi aplicado um carregamento crescente estático mediante uma prensa mecânica, com velocidade de deformação à $0,8 \text{ mm/s} \pm 0,1 \text{ mm/s}$. A carga de ruptura foi feita por intermédio de um anel dinamométrico acoplado à prensa. Para o resultado do ensaio realizou-se a média das tensões de ruptura de 3 corpos de prova (Figura 10).

Figura 10 - Corpo de prova submetido a compressão diametral



Fonte: Autora (2023).

4.2.4.2 Dano por umidade induzida (Lottman)

O ensaio é um indicador de adesividade do agregado ao ligante, utilizando um método de comprovação da sensibilidade à água de corpos de prova. O teste utilizou-se da norma DNIT 180:2018. No ensaio são utilizados seis corpos de prova de cada mistura asfáltica moldados no Compactador Giratório SUPERPAVE, nas dimensões de 100mm de diâmetro e altura de 68mm. A norma citada preconiza que os corpos de prova possuam volume de vazios de 7% a $\pm 0.5\%$, para alcançar esse percentual, a compactação dos CPs foi feita aplicando 30 giros. Apenas um grupo foi submetido a ciclos de gelo-degelo, onde são saturadas com água e sujeitas a baixas temperaturas para que sejam congeladas durante o tempo estabelecido em norma, conforme Figura 11.

Figura 11 - Amostras compactadas cilíndricas saturadas com água



Fonte: Autora (2023).

Ambos os grupos foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral. A resistência à tração indireta aplica ao grupo que passou pelo processo gelo-degelo foi mencionada como “ A_{rtc} ” e a resistência do outro grupo não condicionado foi referida como “ A_{rtnc} ”. O resultado é dado pela Resistência Retida à Tração “ R_{rt} ”, ele foi calculado conforme a equação abaixo:

$$R_{rt}(\%) = \frac{A_{rtc}}{A_{rtnc}} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

- A_{rtc} – Resistência a tração de amostragem condicionada em MPa;
- A_{rtnc} - Resistência a tração de amostragem não condicionada em MPa;
- R_{rt} - Resistência retida a tração em percentual;

4.2.4.3 Módulo de resiliência (MR)

O método de ensaio mede a rigidez de misturas asfálticas a partir do módulo de resiliência a uma temperatura geralmente definida entre $25^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ sob uso do equipamento de compressão diametral de carga repetida segundo a norma DNIT 135:2018. Os ensaios foram realizados à temperatura de 25°C referente à temperatura ambiente, utilizando-se de três amostras de cada grupo de mistura.

Com uso do CGS foram moldados os corpos de prova cilíndricos, com

diâmetros de 100mm e altura de aproximadamente 64mm. Utilizando o equipamento UTM-25 aplicando uma carga vertical no formato de onda *haversine* no plano diametral dos CPs. A força máxima aplicada corresponde a 10% da tensão obtida no ensaio de tração por compressão diametral. Foi utilizada uma frequência de carregamento de 1Hz, no qual um ciclo condiz a 0.1s de aplicação de carga sucedido de 0.9s de descanso. A ação da carga gera uma tensão de tração transversal ao plano aplicado, dessa forma há um deslocamento diametral recuperável em direção horizontal equivalente à tensão que foi gerada. Foram empregados dois transdutores mecânicos eletromagnéticos do tipo *Linear Variable Differential Transducer* (LVDT) foram presos aos corpos de prova por alças de referência para medir o deslocamento horizontal dos CPs.

4.2.4.4 Resistência à fadiga

O Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada é normatizado pelo DNIT 183:2018. Novamente foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 100mm de diâmetro e 64mm de altura aproximadamente, compactados no CGS, foram submetidos à compressão diametral, gerando um estado biaxial de tensão de tração perpendicular à direção da carga aplicada, a aplicação foi feita utilizando no UTM-25, por pulsos de carregamentos *haversine* à frequência de 1 Hz, correspondendo a 0.1s de aplicação de carga sucedido de 0.9s de repouso. A deformação ocasionada pela tração ocasiona na ruptura do corpo de prova.

Foi definido o critério de parada do ensaio como o deslocamento final do atuador de 8mm, garantindo a ruptura completa do corpo de prova. É necessário registrar o número de ciclos de carregamento a cada nível de tensão o que provoca ruptura para avaliar a vida de fadiga da mistura. Diante da norma faz-se necessária a realização com quatro cargas diferentes, de forma que gere quatro níveis de tensão, os valores devem estar entre o intervalo de 5% a 40% da resistência à tração indireta da mistura esfáltica.

Os níveis de tensão escolhidos para utilização foram 45%, 42.5%, 40%, e 37.5% da resistência à tração de cada mistura estudada. A interpretação foi realizada segundo o estudo de Mocelin (2018), que aponta a interpretação por meio de curvas relacionando os níveis de tensão com o N das amostras, pelo modelo de fadiga (Curvas de Wohler) que as ajustam por uma função exponencial.

Determinados os valores de N das amostras, foram plotadas curvas dos valores versus deformação de tração inicial (ϵ_i) e versus a diferença de tensões no centro das amostras ($\Delta\sigma$), disposto em um gráfico log-log, para todos os níveis de tensão avaliados. Sucessivamente foi ajustada a linha de tendência, por meio de regressão linear, usando o modelo de Wohler de previsão de fadiga. O DNIT recomenda que a regressão apresente R^2 mínimo de 0.8. As Equações (2 e 3) foram utilizadas para determinar os coeficientes:

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

$$N = k_3 x \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{n_3} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

- N - Número de ciclos do carregamento que leva a amostragem à ruptura (*Característico da mistura asfáltica estudada*);
- ϵ_i – Deformação resiliente inicial (*Característico da mistura asfáltica estudada*);
- $\Delta\sigma$ - Diferença de tensões no centro do corpo de prova em MPa (*Característico da mistura asfáltica estudada*);
- k_i e n_i – Constantes obtidas a partir da regressão linear dos pares N;

4.3 Análise de custos

A análise econômica foi de maneira análoga ao método apresentado por Melo Neto (2022), no tocante a consideração de menor custo de produção e desempenho da mistura acrescida de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) e resíduo de óleo vegetal comparada à mistura de parâmetro. A composição de custos foi realizada sem desoneração, que é uma forma utilizada quando se deseja ter uma visão mais próxima dos custos reais de mercado, sem considerar os incentivos fiscais.

A tabela Sistema de Custos Rodoviários (SICRO), por conter uma ampla lista de itens e serviços relacionados à construção, manutenção, conservação de rodovias e permitir uma padronização dos custos facilitando a comparação entre propostas e contratos relacionados ao setor de infraestrutura viária. Priorizou-se a SICRO da

região Nordeste, estado da Paraíba, referente a janeiro de 2023 para composição de custos de mão de obra, equipamentos e materiais exceto ligante asfáltico.

As tabelas de orçamento da SEINFRA são elaboradas por especialistas, considerando os custos reais. As informações são atualizadas regularmente, levando em conta os preços de mercado e as tendências do setor. Desta forma, essas tabelas são geralmente confiáveis e podem fornecer estimativas mais precisas. Diante disto, a tabela da Agência Goiana de Infraestrutura e Transportes (GOINFRA) de terraplenagem, pavimentação e obras de arte especiais, referente ao período de março de 2023 foi empregue para composição de custos de transporte.

Em razão de ambas as tabelas SICRO e GOINFRA consultadas para elaboração do orçamento não apresentarem um valor específico para CAP 50/70, utilizou-se a Tabela de Preços para Materiais Betuminosos SEINFRA do Governo do Estado do Ceará referente a maio de 2023, tendo este insumo origem de preço ANP CEARÁ.

Os percentuais dos materiais foram utilizados conforme as dosagens das misturas e foram utilizados para calcular os custos, fazendo conversão das quantidades quando necessário para compor o Quadro 1 que se encontra no tópico 5.2.

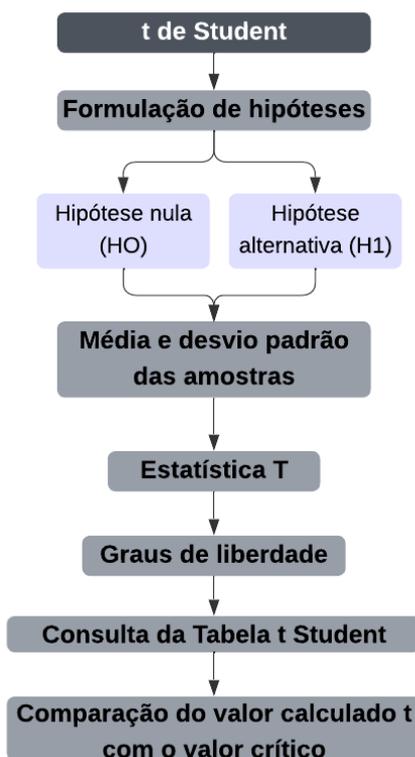
Considerou-se uma rodovia pavimentada para o custeio de tráfego de materiais, onde os fornecedores estariam em localidades de fácil acesso, não sendo necessárias maiores manobras de mobilização. Todo o custeio está entorno da produção de 1 tonelada de mistura asfáltica e a distância de 50km de transporte.

Devido o RAP ser um material residual e comumente descartado, em seu custeio foi considerado apenas o transporte para aquisição do material para uso. Para o custo do ácido graxo da borra do óleo de soja utilizou-se o mesmo valor utilizado por Melo Neto (2022) em sua pesquisa.

4.4 Teste t de Student

O teste estatístico t de Student é bastante utilizado para comparar duas amostras independentes através de suas médias, o uso é adequado quando essas amostras possuem variâncias semelhantes. A Figura 12 demonstra as etapas para realização do teste estatístico.

Figura 12 - Fluxograma básico para realizar o teste t de Student



Fonte: Autora (2023).

A análise iniciou-se pela formulação de hipóteses, onde a Hipótese Nula (HO) = *Não há diferença significativa no âmbito estatístico entre as médias das amostras*. Em síntese, tem-se a hipótese alternativa (H1) = *Afirma que há diferença significativa entre ambas as misturas*.

No software de planilhas eletrônicas Excel as médias e desvio padrão foram computados e dispostos em tabela, para que em seguida, fosse feita a análise de dados no qual o parâmetro *Test-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes* foi selecionado para gerar os dados estatísticos como Estatística T, graus de liberdade, variância, t tabelado e valor para teste de hipóteses média. Utilizou-se do nível de significância α (alfa) de 0,05 o equivalente a 5%, o que significa que há aceitação de um erro de 5% ao rejeitar a hipótese nula incorretamente.

Por fim é importante considerar o valor crítico do teste, sendo este um limite estabelecido para determinar se a diferença entre as médias é significativa estatisticamente ou não. Comparando o valor de t calculado com o valor crítico obtido, se o valor calculado de t for maior que o valor crítico, indica que é estatisticamente significativa a diferença das médias diante do nível estabelecido, permitindo dessa forma rejeitar a hipótese nula. Quando não, se o valor de t for igual ou menor que o

valor crítico, não será possível rejeitar a hipótese nula, indicando que não existe diferença estatisticamente significativa entre as médias em análise.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

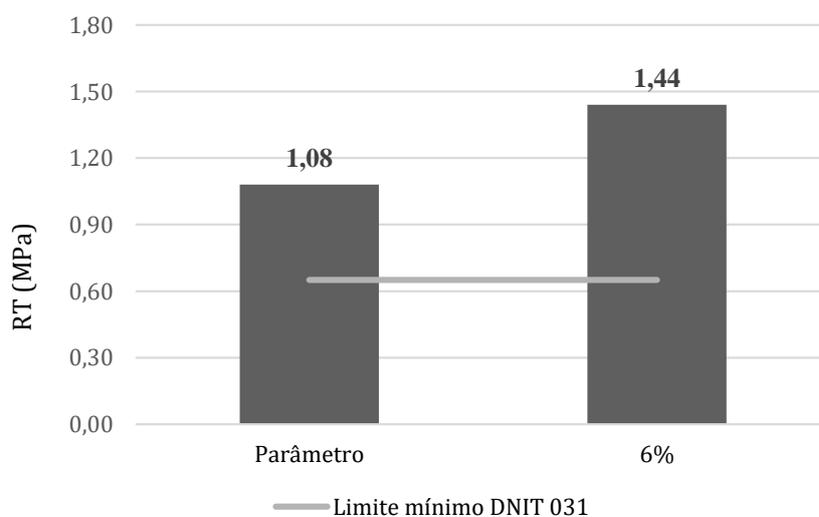
Esse capítulo apresenta resultados e discussões acerca dos resultados dos ensaios abordados no capítulo anterior, analisando a mistura asfáltica de parâmetro e a mistura asfáltica reciclada que contempla o uso do RAP e 6% de AGBS. O presente tópico abrange inclusive a análise de custo estimado da mistura asfáltica.

5.1 Avaliação de desempenho mecânico das misturas

5.1.1 Resistência à tração por compressão diâmetral (RT)

Analisaram-se os resultados do ensaio de resistência à tração (RT) para ambas as misturas, tanto a de parâmetro como a reciclada com teor de 6% de AGBS. Para esse fim, consultando a norma DNIT 031:2006, verificou-se que o estabelecido como valor limite mínimo de resistência à tração por compressão diâmetral estática a 25°C em MPa segundo método de ensaio DNER-ME 138 para camada de rolamento e camada de ligação é de 0,65 MPa. A Figura 13 demonstra os valores médios obtidos no ensaio para ambas as misturas. Diante dos resultados, pode-se verificar que as amostras avaliadas atendem ao requisito estabelecido de tensão mínima a 0,65 MPa.

Figura 13 - Resultados das misturas asfálticas submetidas ao ensaio de resistência a tração por compressão diâmetral



Fonte: Autora (2023).

Os resultados apresentaram um aumento de 33,33% de resistência à tração

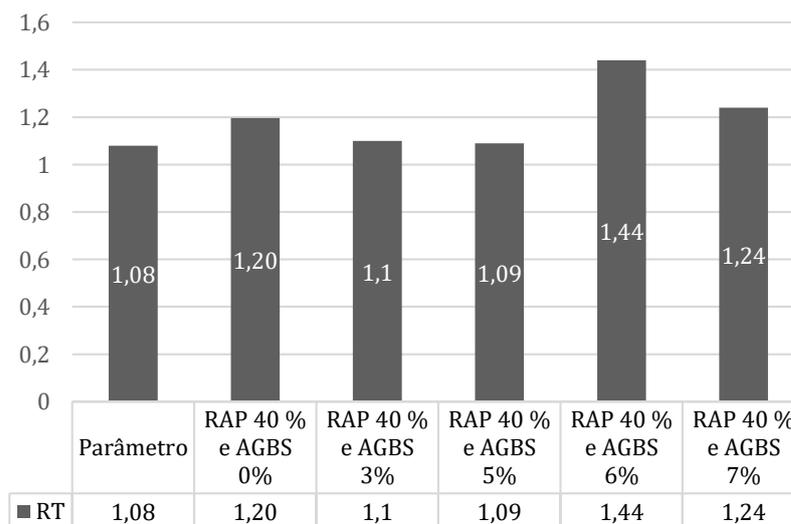
quando comparada à mistura de parâmetro, indicando que com a adição de 40% de RAP, a mistura reciclada ganhou rigidez.

Esses resultados corroboram com o estudo desenvolvido por Monteiro, Silva e Rezende (2023) que utilizaram um agente rejuvenescedor a base de Xisto, um material proveniente do petróleo, incorporado ao RAP, em que a mistura acrescida de RAP apresentou melhor resultado de resistência à tração do que misturas convencionais utilizadas na região de estudo.

O resultado encontrado substância com a hipótese de pontencial recuperação das propriedades reológicas do ligante asfáltico presente no RAP com adição de AGBS, de forma a atuar como um agente rejuvenescedor.

Os resultados reforçam o estudo de Silva (2021), o qual utilizou material fresado e glicerina, um composto orgânico não corrosivo. Sendo uma mistura de referência (AREF), uma mistura com 30% de RAP (ARAP30), uma mistura com 30% de RAP e 4% de glicerina (ARAP30+4%Gli) e por último uma mistura com RAP em 30% e 6% de glicerina (ARAP30+6%Gli). Ao avaliar a mistura com teor de 6% de glicerina e 30% de RAP verificou-se um aumento significativo quando comparado a mistura convencional de $\approx 67,83\%$. A Figura 14 apresenta o desempenho quanto ao ensaio RT em relação à literatura (Melo Neto, 2022; Amorim, 2022).

Figura 14 - Ensaio de resistência a tração por compressão diametral comparação com a literatura



Fonte: Autora (2023).

Ao comparar a resistência à tração com a literatura, os teores de 0%, 3% e 5% estudados por Melo Neto (2022), à medida que o teor de ácido graxo da borra do óleo

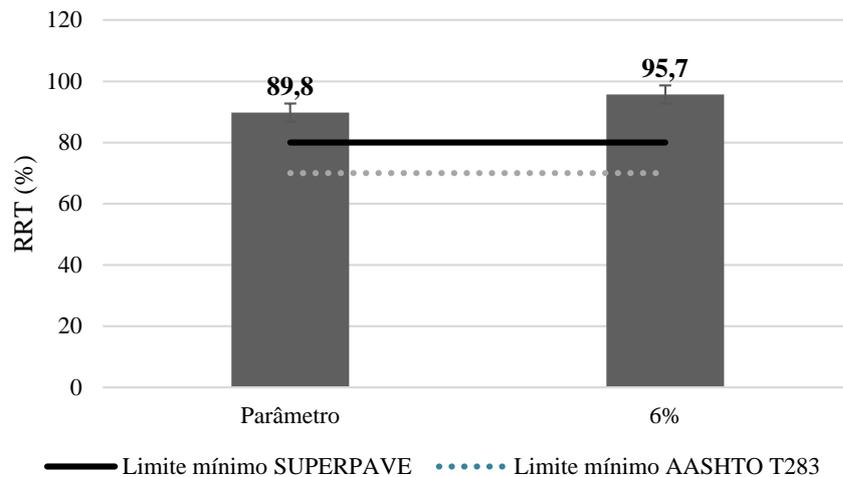
de soja aumenta, a resistência a tração diminui, porém esse padrão é quebrado com a mistura de 6% de AGBS. No entanto, quando comparada à de 7% estudada por Amorim (2022), volta a decrescer. O pico no valor de RT para a mistura de 6% que se difere no comportamento das demais, pode ser explicado devido à composição do RAP não possuir um comportamento linear visto que é um material heterogêneo e sua composição pode variar na distribuição dos trechos ou, nesse caso, nos corpos de prova. A própria execução dos métodos ensaiados que mesmo com a realização correta, não propriamente são idênticas, além da estocagem o que podem causar mudança das propriedades.

5.1.2 Dano por umidade induzida (LOTTMAN)

Os resultados do ensaio de resistência retida à tração (RRT) para mistura de parâmetro e mistura reciclada com teor de 6% de AGBS estão demonstrados na Figura 15. Os valores mínimos empregados para que a suscetibilidade à umidade empregada seja aceitável é de 80%, segundo o método SUPERPAVE. As normas DNIT 031 (2006) e AASTHO T 283 (2021) adotam 70% como valor mínimo.

Os valores atingidos por ambas as misturas asfálticas foram superiores aos estabelecidos por norma. A mistura asfáltica de parâmetro apresentou menor resistência retida à tração enquanto a mistura acrescida de RAP e AGBS apresentaram um resultado superior no valor de 6,57%, porém próximos entre si.

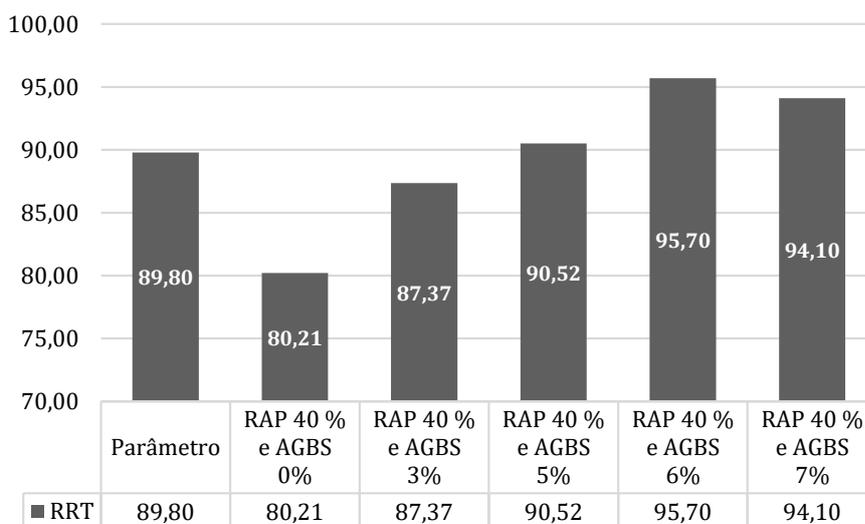
Torres *et al.* (2022) analisaram o comportamento de misturas asfálticas utilizando óleo vegetal residual e material fresado, demonstrando que o teor de material fresado influencia os efeitos de dano por umidade induzida de forma superior ao óleo vegetal residual.

Figura 15 - Resultados das misturas asfálticas submetidas ao ensaio de dano por umidade induzida

Fonte: Autora (2023).

Nunes (2021) verificou amostras com teores diferentes, uma sem RAP, uma com 30% de RAP acrescido de 2% de óleo de girassol, uma com 50% de RAP acrescido de 2% de óleo de girassol e por fim uma com 70% de RAP acrescido de 2% de óleo de girassol. Amostras com teores entre 0% e 30% de RAP apresentaram valores de RRT satisfatórios contudo, ao serem acrescidos do óleo de girassol, pode-se verificar uma redução dos valores. Essa condição pode ser justificada pelo alcance de máximo teor, o que ocasiona em uma contenção de resposta à solitação mecânica.

Ao comparar as duas misturas asfálticas analisadas, pode-se observar que a mistura asfáltica convencional apresentou uma resistência retida à tração menor em relação à mistura acrescida de RAP e AGBS. Isso sugere que a adição de RAP e AGBS contribuiu para um melhor desempenho em termos de resistência retida à tração. A Figura 16 apresenta o desempenho quanto ao ensaio RRT em relação à literatura (Melo Neto, 2022; Amorim, 2022).

Figura 16 - Ensaio de resistência retida à tração comparação com a literatura

Fonte: Autora (2023).

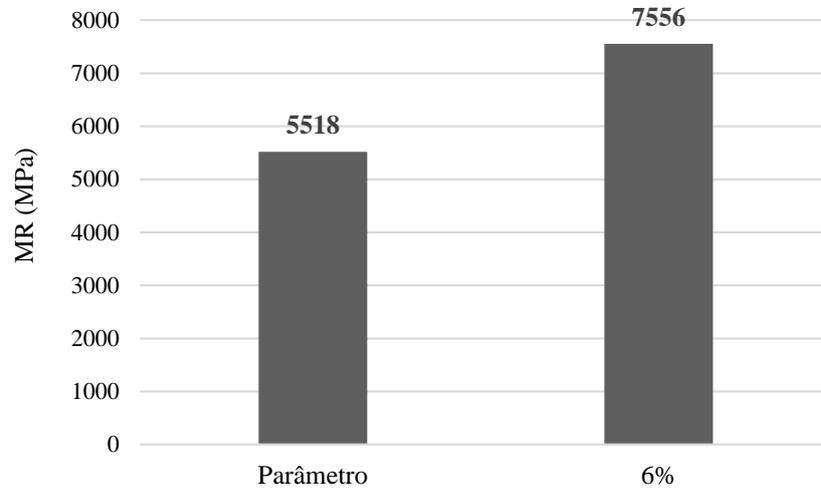
A Figura 16, compara o teor de 6% com os teores de 0%, 3% e 5% estudados por Melo Neto (2022) e 7% estudada por Amorim (2022), todos com teor de 40% de RAP, exceto a mistura de parâmetro. Pode-se concluir que o comportamento das misturas se demonstrou crescente com exclusão da mistura de parâmetro e de 6% de AGBS. Assim, uma maior concentração de um componente específico pode aumentar a resistência retida à tração entre as partículas, enquanto uma menor concentração pode diminuí-las, uma vez que o RAP possui sua heterogeneidade. Ao comparar a mistura com menor RRT (RAP 40 % e AGBS 0%), com a mistura de maior RRT (RAP 40 % e AGBS 6%) obteve-se uma diferença de 19,311%.

5.1.3 Módulo de resiliência (MR)

A Figura 17 apresenta os resultados do ensaio de módulo de resiliência (MR), para misturas asfálticas de parâmetro e reciclada com AGBS. Comparando ambas as misturas, a mistura reciclada acrescida de AGBS no teor de 6% apresentou um aumento de 36,93% em relação à mistura asfáltica de parâmetro. O uso do agente rejuvenescedor não altera o módulo de resiliência, já o uso do RAP aumentou do módulo de resiliência das misturas asfálticas. O valor da mistura de referência ocorre, pois o modificador ocasiona no RAP um efeito de amolecimento e redução, contudo, o aumento de valor no módulo de resiliência ocorre em razão da elevada rigidez apresentada pelo RAP. O uso de AGBS tem como função reduzir a viscosidade que

o ligante apresenta, diminuindo o valor do módulo de resiliência.

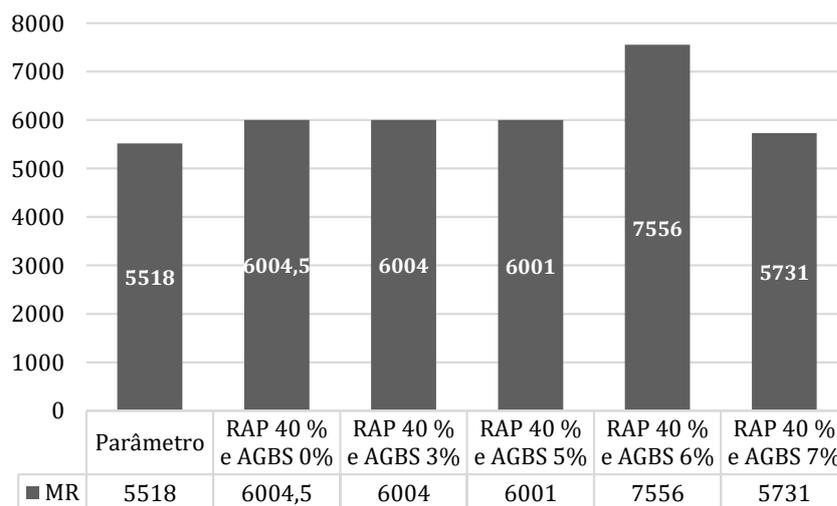
Figura 17 - Resultados das misturas asfálticas submetidas ao ensaio de módulo de resiliência



Fonte: Autora (2023).

Esses resultados corroboram com o estudo desenvolvido por Silva (2021), no qual a rigidez das misturas aumentou devido à influência do RAP e da glicerina que foi utilizada como agente rejuvenescedor. A Figura 18 apresenta o desempenho quanto ao ensaio MR em relação à literatura (Melo Neto, 2022; Amorim, 2022).

Figura 18 - Ensaio do módulo de resiliência comparação com a literatura



Fonte: Autora (2023).

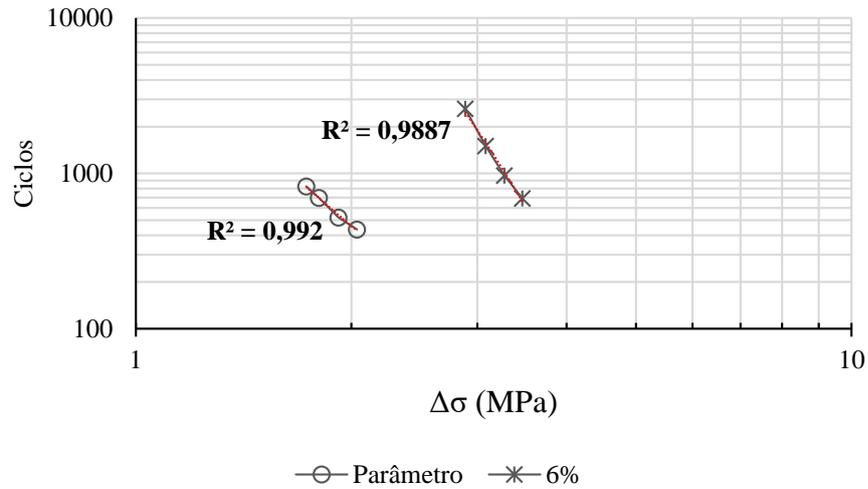
Para composição da Figura 18, considerou-se os estudos de Melo Neto (2022) que investigou os teores de 0%, 3% e 5%, enquanto Amorim (2022) estudou o teor de

7%, ambos os estudos tiveram como base um teor de 40% de RAP. É possível observar uma linearidade entre os valores de Melo Neto (2022), sobre os demais tem-se picos de valores que não seguem tal linearidade e isso pode ocorrer por vários motivos, como a amostragem do material que pode conter em sua composição variação de substâncias. Comparando-se o menor valor de MR (Parâmetro) com o maior (RAP 40 % e AGBS 6%) obtém-se uma diferença de 36,93%. A mistura com MR superior é geralmente mais rígida e menos deformável, menos suscetíveis a deformações permanentes. Portanto, mesmo quando submetida a cargas significativas, a mistura é capaz de retornar à sua forma original após a remoção da carga, mantendo sua integridade estrutural.

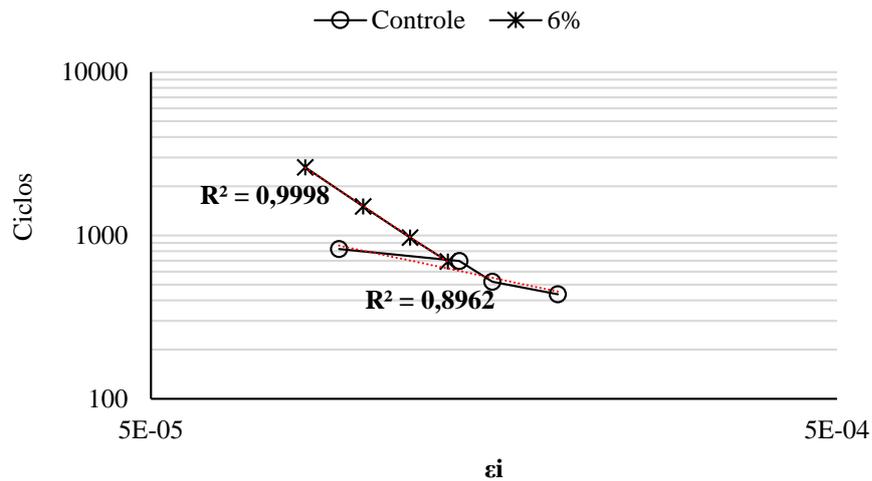
5.1.4 Fadiga por compressão diâmetral

Os resultados obtidos no ensaio de fadiga por compressão diâmetral à tensão controlada estão dispostos na Figura 19 em um diagrama log-log que relaciona os ciclos até atingir a ruptura versus a diferença de tensão no centro do CP e na Figura 20 que relaciona os ciclos até atingir a ruptura versus a deformação inicial permanente. Os diagramas representados nas figuras compreendem linhas de tendências (curvas de Wholer) ajustadas aos resultados de fadiga das misturas.

O gráfico da Figura 19 demonstra que a mistura reciclada resistiu a uma quantidade superior de ciclos e a uma maior variação de tensões quando comparada à mistura de parâmetro. Ambas as misturas analisadas apresentaram coeficientes de determinação favoráveis, uma vez que a norma DNIT183/2018 especifica valor mínimo para R^2 de 0.8, para que não seja necessário aumentar o número de CPs ensaiados a fim de melhorar o ajuste, contudo as misturas atenderam o requisito apresentando valores superiores a 0.8.

Figura 19 - Número de ciclos suportados até a ruptura versus a diferença de tensão no centro do CP

Fonte: Autora (2023).

Figura 20 - Número de ciclos suportados até a ruptura versus a deformação inicial permanente

Fonte: Autora (2023).

O resultado demonstrado no gráfico da Figura 20, relata o número de ciclos suportados até a ruptura versus a deformação inicial permanente. A mistura asfáltica reciclada com teor de 6% de AGBS resistiu a um número superior de ciclos, apontou menor deformação e de acordo com as curvas de Wholer a mistura apresentou um progresso no comportamento quando comparada à mistura de parâmetro.

Silva (2020) utilizou agentes rejuvenescedores em variadas taxas à base de alcatrão e de óleo de xisto em relação ao peso do ligante. Onde as configurações de material fresado com aditivos conhecidos comercialmente como (CAP 50-70, AR-5, AR-250 e AR-500) demonstraram um desempenho da vida de fadiga elevado ao de uma nova mistura CBUQ – Faixa C, exceto Rejuva-Seal e material fresado sem

adição.

A fadiga é ocasionada devido ao acúmulo de tensões povocadas pelo tráfego ao logo do tempo de utilização. Esse acúmulo de tensões resultam em danos progressivos capazes de manifestar várias patologias como trincas, escamação, quebra localizada, desagregação e deformações. Misturas recicladas com teor elevado de RAP, podem apresentar trincas em função da elevada rigidez do ligante. Os agentes rejuvenescedores viabilizam o uso do RAP em virtude de aumentar o desempenho a fissura por fadiga.

5.2 Análise de custo de produção

O uso de materiais reciclados na pavimentação agrega diversos benefícios econômicos como redução de custo, diminuição na demanda de matéria prima- virgem, redução do custeio de disposição de resíduos, o que muitas vezes pode vir a estimular a economia local.

A Tabela 9 compõe a estimativa sobre o custeio para produção das misturas asfálticas trabalhadas na pesquisa a partir de uma composição unitária. Para produção de misturas asfálticas o custeio total foi orçamentado pelo somatório da multiplicação de cada unidade pelo custo unitário do insumo.

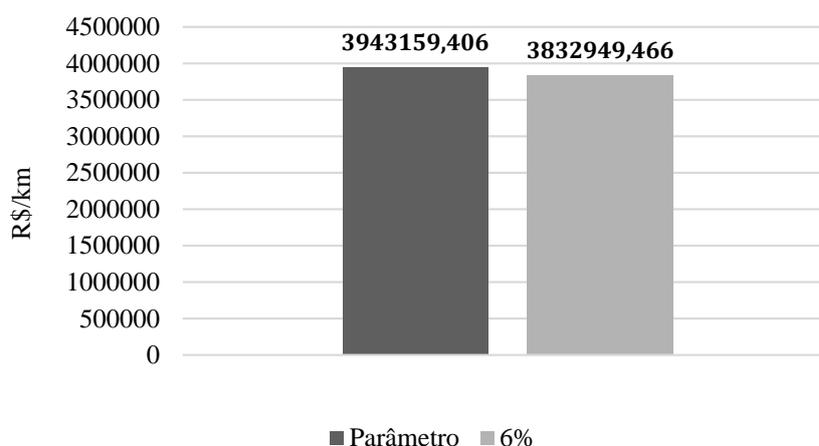
Tabela 9 - Custeio de produção das misturas asfálticas

COMPOSIÇÃO DE CUSTOS								
2023			Unidade: T					
COMPOSIÇÃO			Controle	6%		Custo Total R\$		
Item	Código	Descrição	Unidade	Quantidade	Quantidade	R\$	Controle	6%
Mão de Obra	P9824	Servente	h	4,0000	4,0000	18,4583	73,83	73,83
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	h	1,0000	1,0000	72,2922	72,29	72,29
Equipamento	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	h	1,0000	1,0000	205,7091	205,71	205,71
	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	h	1,0000	1,0000	463,6290	463,63	463,63

	E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	h	2,0000	2,0000	56,9973	113,99	113,99
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	h	1,0000	1,0000	1105,1775	1105,18	1105,18
	40445	Transporte local de agregados	m³ x Km	18,4874	18,9816	2,1000	38,82	39,86
Transporte	40435	Transporte local de material betuminoso - OBS: Transporte de ligante asfáltico e ácido graxo da borra do óleo de soja	T x KM	2,4000	1,7556	3,1500	7,56	5,53
	M0028	Areia média	m³	0,0180	0,0034	153,9671	2,77	0,52
	M0005	Brita 0	m³	0,0979	0,0651	156,9158	15,36	10,22
	M0191	Brita 1	m³	0,0515	0,0511	144,1296	7,42	7,37
	M0344	Cal hidratada a granel	m³	0,0112	0,0053	1034,4020	11,56	5,48
Material	M1103	Pedrisco CIMENTO	m³	0,1912	0,0924	153,2916	29,31	14,17
	I0798	ASFALTICO CAP 50/70	T	0,0480	0,0329	4286,8500	205,77	141,04
	-	Material fresado (RAP)	m³	0,0000	0,1623	0,0000	0,00	0,00
	-	Ácido graxo da borra do óleo de soja	T	0,0000	0,0022	5500,0000	0,00	12,16
Custo Total (R\$)							2353,21	2270,98

Fonte: Autora (2023).

Analisando unicamente o custeio da produção de ambas as misturas não divergem de forma significativa entre si. A partir dos custos, pode-se observar que a mistura reciclada com teor de 6% de AGBS apontou uma diminuição de custo de R\$82,23, o equivalente a 3,62%, quando comparada à mistura asfáltica de parâmetro. Em todos os testes mecânicos os quais foram submetidas as misturas, observou-se que a mistura que possuía RAP e AGBS mostrou um melhor desempenho quando comparada a de parâmetro. Os custos de produção por quilômetro de rodovia das misturas asfálticas estão dispostos na Figura 21.

Figura 21 - Custo das misturas asfálticas por quilômetro de rodovia

Fonte: Autora (2023).

Considerou-se para os cálculos o custo de uma rodovia com largura de 7 metros e com tráfego de nível (N) entre 10^7 e 5×10^7 . Assim, seriam necessários 700 m³ mistura asfáltica para pavimentar 1 quilômetro de rodovia e, portanto, para 1 tonelada da mistura de parâmetro e de mistura reciclada com 6% de AGBS são necessários, respectivamente, 0,4177m³ e 0,4147 m³. Por fim, analisando o custo das misturas pode-se inferir que o uso de agente rejuvenescedor é de baixo custo e não interfere de forma considerável no custo total de produção da mistura asfáltica, já o uso do RAP permite uma diminuição do custo total da produção. Esses custos podem variar de acordo com a distância de transporte, sendo favorável a produção de misturas asfálticas *in loco*.

5.3 Análise estatística

A análise tem como objetivo principal investigar e compreender as propriedades e comportamento de materiais. Essa análise estatística é fundamental para obter informações significativas e confiáveis a partir dos dados coletados durante o ensaio. De acordo com a análise t Student, foi possível investigar dados estatísticos para o ensaio de resistência à tração, conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Dados do teste estatístico para o ensaio de resistência à tração

Resistência à tração (RT)		
Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
	<i>Parâmetro</i>	<i>6%</i>
Média	1,083333333	1,446667
Variância	0,003333333	0,005733
Observações	3	3
Variância agrupada	0,004533333	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	4	
Stat t	-6,609095782	
P(T<=t) uni-caudal	0,001358358	
t crítico uni-caudal	2,131846786	
P(T<=t) bi-caudal	0,002716717	
t crítico bi-caudal	2,776445105	

***gl = Graus de liberdade.**

Fonte: Autora (2023).

A partir dos dados na Tabela 10, pode-se observar que o valor de p (0,002) foi inferior ao nível de significância α (0,05), o que revela que a hipótese nula deve ser rejeitada. Desta forma, existem evidências estatisticamente significativas para afirmar que há uma diferença significativa entre as misturas. Assim, a mistura de parâmetro possui menor resistência ao fluxo e é mais suscetível às deformações permanentes e falhas estruturais, quando comparada a mistura reciclada acrescida de AGBS. Diante da Tabela 11, pode-se analisar os valores estatísticos para a resistência retida à tração, conforme demonstrado.

Tabela 11 - Dados do teste estatístico para o ensaio de resistência retida à tração

Resistência Retida à Tração (RRT)		
Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
	<i>Parâmetro</i>	<i>6%</i>
Média	89,8	95,7
Variância	2,92	2,17
Observações	3	3
Variância agrupada	2,545	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	4	
Stat t	-4,529536335	
P(T<=t) uni-caudal	0,005290541	
t crítico uni-caudal	2,131846786	
P(T<=t) bi-caudal	0,010581082	
t crítico bi-caudal	2,776445105	

***gl = Graus de liberdade.**

Fonte: Autora (2023).

Pode-se observar que o valor de p (0,010) foi inferior ao nível de significância α (0,05) e, desta forma, a hipótese nula deve ser rejeitada. Isso significa que existem evidências estatisticamente significativas para afirmar que há uma diferença ou relação significativa entre as misturas. A partir dos parâmetros do teste estatístico t Student para o módulo de resiliência, tem-se a Tabela 12.

Tabela 12 - Dados do teste estatístico para o ensaio de Módulo de Resiliência

Módulo de Resiliência (MR)		
Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
	<i>Parâmetro</i>	<i>6%</i>
Média	5518	7556
Variância	789343	669628
Observações	3	3
Variância agrupada	729485,5	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	4	
Stat t	-2,922412234	
P(T<=t) uni-caudal	0,021569683	
t crítico uni-caudal	2,131846786	
P(T<=t) bi-caudal	0,043139366	
t crítico bi-caudal	2,776445105	

*gl = Graus de liberdade.

Fonte: Autora (2023).

Analisando a Tabela 12, observa-se que o valor de p (0,04314) foi inferior ao nível de significância α (0,05). Desta forma, a hipótese nula deve ser rejeitada. Isso significa que existem evidências estatisticamente significativas para afirmar que há uma diferença ou relação significativa entre as misturas. Assim, a mistura asfáltica de parâmetro apresentou menor capacidade de recuperação elástica e é mais propenso às deformações permanentes e falhas estruturais quando comparada com a mistura asfáltica reciclada.

Amorim (2022) em sua pesquisa comparou uma mistura de controle e em seguida utilizou a mesma composição da mistura em conjunto com uma porcentagem de 7% de AGBS em mistura asfáltica reciclada. Para o ensaio de resistência a tração, foi apresentada uma diferença estatística entre as médias dos valores de RT das misturas e analisando o valor de p , verificou-se que $p \leq \alpha$, rejeitando a hipótese nula, afirmando que há uma diferença ou relação significativa. Para o ensaio de Lottman, foi apontada uma diferença significativa entre as médias dos valores de RRT e

apresentou $p \leq \alpha$ rejeitando a hipótese nula. Por fim, o teste estatístico para o módulo de resiliência, não demonstrou diferença significativa entre as médias, onde o valor de p foi superior ao nível de significância, indicando que não há evidências estatisticamente significativas para afirmar que há uma diferença entre as misturas. Ao comparar com os dados obtidos nesse estudo pode-se observar que por mais que estivesse se tratando de um teor do ácido graxo da borra do óleo de soja próximo ao estudado nessa pesquisa, apresentou hipóteses divergentes quanto ao teste feito para o módulo de resiliência (MR). As análises acima permitem verificar e garantir que as misturas venham a atender aos critérios desejados.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

Nesta seção, são apresentados os principais achados da pesquisa e suas implicações, bem como destacadas as limitações do estudo e possíveis direções para investigações posteriores.

6.1 Considerações finais

Os resultados obtidos nesta pesquisa fornecem evidências de que a utilização de misturas asfálticas recicladas com adição de AGBS como agentes rejuvenescedores pode ser uma alternativa viável e sustentável para a pavimentação de rodovias, contribuindo para o aumento da durabilidade e desempenho das estruturas asfálticas.

Desta forma, é possível concluir que:

(1) A adição de 6% de ácido graxo da borra do óleo de soja em misturas asfálticas recicladas apresentou um desempenho superior em relação à mistura de parâmetro. Essa melhoria é evidenciada pelo aumento da resistência à tração em 33,33%, aumento do módulo de resiliência em 36,93% e maior resistência à fadiga em comparação com as misturas convencionais.

(2) A adição de RAP e AGBS contribuíram para um melhor desempenho em termos de resistência retida à tração, um resultado superior no valor de 6,57%.

(3) O custo estimado de produção da mistura asfáltica reciclada com AGBS se mostrou viável uma vez que, o valor foi inferior ao da mistura de parâmetro com uma diminuição de custo de R\$82,23 o equivalente a 3,62% por tonelada. O custo das misturas asfálticas com teor de 6% de AGBS e 40% de RAP foi 2,8% inferior à mistura de parâmetro com relação ao custo por quilômetro (R\$/km).

Em suma, pode-se concluir que a adição de 6% de ácido graxo da borra do óleo de soja em misturas asfálticas recicladas com 40% de RAP é viável economicamente e tecnicamente visto que demonstrou um desempenho geral superior à mistura de parâmetro.

6.2 Sugestões para pesquisas futuras

Com base nos resultados e nas informações apresentadas, existem várias sugestões de pesquisas futuras que podem ser exploradas para ampliar o conhecimento e a compreensão sobre o tema:

- (1) Análise do desempenho em longo prazo, considerando a exposição a diferentes condições ambientais e de tráfego.
- (2) Realizar um estudo ambiental envolvendo o índice de circularidade das misturas asfálticas.
- (3) Avaliar o ciclo de vida dessas misturas asfálticas.
- (4) Analisar o grau de interação entre o ligante asfáltico presente no RAP com o ligante asfáltico modificado com o AGBS.

REFERÊNCIAS

AMORIM, Alex Guedes. **Análise de uma mistura asfáltica reciclada com ácido graxo da borra do óleo de soja**. 2022. 69f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Araruna, 2022.

ARAÚJO, Anderson Magalhães *et al.* Borra Ácida do Processamento do Óleo de Soja: Processos Reacionais e Caracterizações. **Blucher Engineering Proceedings**, v. 3, n. 2, p. 667-673, 2016.

ARAÚJO, Anderson Magalhães. **Borra de óleo de soja**: caracterização físico-química e avaliação da potencialidade econômica. 2016. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em:
https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/34614/1/2016_tcc_amaraujo.pdf. Acesso em: 25 abr. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Norma Brasileira. ABNT NBR 1004. **Resíduos sólidos – Classificação**. 2004. Disponível em:
<https://analiticaqmresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2023.

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 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, 2014.

Unidos, 2020. 62

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 Gyrotory Compactor. Estados Unidos, 2015.

BERNUCCI, Liedi *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro : PETROBRAS: ABEDA, 2022. Disponível em: <https://triumfotransbrasiliiana.com.br/wp-content/uploads/2022/07/PA-Completo-2022.pdf> Acesso em: 9 jun. 2023.

BONFIM, Valmir; DOMINGUES, Felipe Augusto Aranha. **Utilizacao de fresagem e reciclagem *in situ* a frio: alternativas na recuperacao de pavimentos asfálticos**. Anais, 1995.

CALLEGARO, Álisson Marian. **Utilização da borra de soja na terminação de novilhos em confinamento**. 2011. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/10762/CALLEGARO%2c%20ALISSON%20MARIAN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 25 abr. 2023.

CENTOFANTE, Roberta *et al.* Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?**. 2017. Disponível em: <https://cnt.org.br/agencia-cnt/cnt-divulga-estudo-por-que-pavimento-rodovias-brasil-nao-duram-resultados>. Acesso em: 05 jun. 2022.

COPELAND, Audrey *et al.* **Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice**. United States. Federal Highway Administration. Office of Research, Development, and Technology, 2011.

CORREA, Bethania Machado. **Análise de rigidez e danificação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes tipos e teores de RAP**. 2020. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/22199/DIS_PPGEC_2020_CORREA_B

ETHANIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 25 abr. 2023.

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.

FRÉ, Nicéia Chies da. **Obtenção de Ácidos Graxos a Partir da Acidulação de Borra de Neutralização de Óleo de Soja**. 2009. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

GENNESSEAU, Manuela de Mesquita Lopes. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado**. 2015. 195 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-14072016-145634/publico/ManueladeMesquitaLopesGennesseaux2015.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2023.

GUIMARÃES, Daniela Muniz D.'Antona *et al.* A influência da composição granulométrica segundo as metodologias Bailey, FAD e Marshall no desempenho à deformação permanente de misturas asfálticas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, 2022.

MAMAT, Rosmawati *et al.* A review of performance asphalt mixtures using bio-binder as alternative binder. **Jurnal Teknologi**, v. 77, n. 23, 2015.

MAMUN, Abdullah Al; AL-ABDUL WAHHAB, H. I.; DALHAT, M. A. Comparative evaluation of waste cooking oil and waste engine oil rejuvenated asphalt concrete mixtures. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 45, p. 7987-7997, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04523-5>. Acesso em: 19

jun. 2023.

MARTIN, A. **The Effects of Recycling Agents on Asphalt Mixtures with High RAS and RAP Binder Ratios**. 2016. Disponível em: <http://apps.trb.org/cmsfeed/TRBNetProjectDisplay.asp?ProjectID=3645>. Acesso em: 18 jun. 2023.

MELO NETO, Osires de Medeiros. **Viabilidade de misturas asfálticas recicladas com ácido graxo da borra do óleo de soja**. 2022. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/25583/1/OSIRES%20DE%20MEDEIROS%20MELO%20NETO%20%e2%80%93%20DISSERTA%c3%87%c3%83O%20PPGECA%202022.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2023.

MIRANDA-ARGÜELLO, Fabiola; AGUIAR-MOYA, José Pablo. Mezclas asfálticas con rap: pavimentos asfálticos reciclados. **PITRA-Lanamme UCR**, v. 10, n.1, 2019. Disponível em: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1421/Boletin%201%20%20Mezclas%20asf%C3%A1lticas%20con%20RAP.pdf?sequence=1>. Acesso em: 15 abr. 2023.

MIRHOSSEINI, Ali Foroutan *et al.* Performance evaluation of asphalt mixtures containing high-RAP binder content and bio-oil rejuvenator. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116465, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.191>. 2019. Acesso em: 07 jun. 2023.

MOCELIN, Douglas Martins. **Avaliação do comportamento à fadiga de misturas asfálticas quentes e mornas através do modelo de dano contínuo viscoelástico**. 2018. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/181261/001066666.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 jun. 2023.

MOGAWER, Walaa S. *et al.* Evaluating the effect of rejuvenators on the degree of blending and performance of high RAP, RAS, and RAP/RAS mixtures. **Road Materials and Pavement Design**, v. 14, n. sup2, p. 193-213, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.812836>. Acesso em: 15 jun. 2023.

MONTEIRO, Anna Marinella Carizzio; SILVA, João Paulo Souza; REZENDE, Lilian Ribeiro. Estudo laboratorial de misturas asfálticas recicladas à quente com diferentes teores de asfalto fresado. **Transportes**, v. 31, n. 1, p. 2771-2771, 2023. Disponível em: <https://revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2771>. Acesso em: 12 jun. 2023.

NUNES, Aluska Thayuanne Rocha. **Avaliação de óleo de girassol como aditivo de MAM visando a incorporação de elevadas quantidades de material fresado**. 2021. 96f. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia), Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2021. Disponível em:

<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/23729>. Acesso em: 15 jun. 2023.

NUNES, F. R. G.; DA SILVA, C. L.; DA FROTA, C. A. Identificação do dano induzido por fadiga e cura de micro trincas em compósitos cerâmicos particulados, voltados à aplicação em pavimentos flexíveis. **Cerâmica**, v. 55, p. 425-436, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/rDPRqqKFYn6YTZsCKyf77vw/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 28 jun. 2023.

PEREIRA, Mirian Carvalho. **Revestimentos asfálticos**: tipos e propriedades. 2014. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário de Formiga, Formiga, 2014. Disponível em: <https://repositorioinstitucional.uniformg.edu.br:21074/xmlui/bitstream/handle/123456789/264/TCC%20MIRIAN%20PDF.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 11 jun. 2023.

PINTO, J. I. B. R. **Caracterização superficial de pavimentos rodoviários**. 2003. Dissertação (Mestrado em Vias de Comunicação) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2003.

PRADYUMNA, T. Anil; MITTAL, Abhishek; JAIN, P. K. Characterization of reclaimed asphalt pavement (RAP) for use in bituminous road construction. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 104, p. 1149-1157, 2013.. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.211>. Acesso em: 15 jun. 2023.

SILVA, Amanda Helena Marcandali da. **Avaliação do comportamento de pavimentos com camada reciclada de revestimentos asfálticos a frio com emulsão modificada por polímero**. 2011. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SILVA, Bruna Thalita Alexandre. **Análise do comportamento mecânico de mistura asfáltica reciclada a quente com uso de glicerina como agente rejuvenescedor**. 2021. 71f. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia), Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2021. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/23736>. Acesso em: 15 jun. 2023.

SILVA, Lucas Bezerra; SILVA, Joao Paulo Souza. Modelo de envelhecimento de ligantes asfálticos rejuvenescidos. *In: Congresso de pesquisa e ensino em transportes*. 2020. p. 100. Disponível em: https://www.anpet.org.br/anais34/documentos/2020/Infraestrutura/Ligantes%20e%20Misturas%20Asf%C3%A1lticas%20II/4_176_AC.pdf. Acesso em: 06 de mar. 2023.

SILVA, João Paulo Souza; FARIAS, Márcio Muniz de. Avaliação química e ambiental de misturas asfálticas rejuvenescidas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0523>. Acesso em: 19 jun. 2023.

SILVA, João Paulo Souza; FARIAS, Márcio Muniz de. Estudos laboratoriais para

determinação do comportamento da vida de fadiga de misturas asfálticas rejuvenescidas. **Transportes**, [S. l.], v. 28, n. 1, p. 111–121, 2020. DOI: 10.14295/transportes.v27i4.1869. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1869>. Acesso em: 15 jun. 2023.

SILVÉRIO, Leticia Carlos. **Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas modificadas com a adição do óleo de soja**. 2017. 122 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/23935/1/LET%c3%8dCIA%20CARLOS%20SILV%c3%89RIO%20-%20TCC%20ENG.%20CIVIL%20CTR%202017.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2023.

SOBREIRO, Fernanda Pilati. **Efeito da adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com copolímero SBS**. 2014. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-28052014-100359/pt-br.php>. Acesso em: 15 abr. 2023.

TORRES, Paulo Roberto Barreto *et al.* Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas modificadas com a adição de óleo vegetal residual. **Transportes**, v. 30, n. 1, p. 2585-2585, 2022. Disponível em: <https://revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2585/950>. Acesso em: 8 jun. 2023.

TORRES, Paulo. **Estudo de misturas asfálticas reciclada modificadas com a adição de óleo vegetal residual**. 2020. 109p. (Material Fresado, Agente Rejuvenecedor) - Universidade Federal De Campina Grande – UFCG, Campina Grande, PB, 2020.

VEERARAGAVAN, RK. **Uma investigação do desempenho de materiais de curso de ligante de asfalto misturado a quente (HMA) com alta porcentagem de pavimento de asfalto recuperado (RAP) e rejuvenescedores**. 2016. Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Worcester, Universidade de Worcester, MA, 61 p.

YANG, Xu *et al.* Mechanical performance of asphalt mixtures modified by bio-oils derived from waste wood resources. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 424-431, 2014.

ZENG, Menglan *et al.* Evaluation of asphalt binder containing castor oil-based bioasphalt using conventional tests. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 537-543, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.072>. Acesso em: 17 jun. 2023.

ZHANG, Xiaorui *et al.* Quantifying the rejuvenation effects of soybean-oil on aged asphalt-binder using molecular dynamics simulations. **Journal of Cleaner Production**, v. 317, p. 128375, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128375>. Acesso em: 17 jun. 2023.