



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**VIABILIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS COM ÁCIDO GRAXO
DA BORRA DO ÓLEO DE SOJA**

Campina Grande - PB

2022

OSIRES DE MEDEIROS MELO NETO

**VIABILIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS COM ÁCIDO GRAXO
DA BORRA DO ÓLEO DE SOJA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadoras:

D.S.c. Lêda Christiane de Figueirêdo
Lopes Lucena

D.S.c. Luciana de Figueirêdo Lopes
Lucena

Campina Grande – PB

2022

M528v Melo Neto, Osires de Medeiros.
Viabilidade de misturas asfálticas recicladas com ácido graxo da borra do óleo de soja / Osires de Medeiros Melo Neto. – Campina Grande, 2022.
120 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2022.

"Orientação: Prof.^a Dr.^a Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena, Prof.^a Dr.^a Luciana de Figueirêdo Lopes Lucena".

Referências.

1. Misturas Asfálticas. 2. Agente Rejuvenescedor. 3. Reologia. 4. Desempenho Mecânico. 5. Custos. 6. Índice de Circularidade. I. Lucena, Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes. II. Lucena, Luciana de Figueirêdo Lopes. III. Título.

CDU 625.8(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**
2. **ALUNO(A): OSIRES DE MEDEIROS MELO NETO / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.^a LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFMG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR.^a LUCIANA DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - UFRN - COORIENTADORA, DR. JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES - PPGECA/UFMG - EXAMINADOR INTERNO, DR. LÉLIO ANTÔNIO TEIXEIRA BRITO – UFRGS – EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 04/2022). / TITULO DA DISSERTAÇÃO: “VIABILIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS COM ÁCIDO GRAXO DA BORRA DO ÓLEO DE SOJA” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 08:30 HORAS / FORMA DA SESSÃO: POR VÍDEO CONFERÊNCIA.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA POR VÍDEO CONFERÊNCIA, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
4. **CAMPINA GRANDE, 25 DE FEVEREIRO DE 2022**
- 5.
6. 
7. **LUCIANA DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - UFRN - COORIENTADORA**
- 8.
9. 
10. **LÉLIO ANTÔNIO TEIXEIRA BRITO – UFRGS – EXAMINADOR EXTERNO**

Documento assinado eletronicamente por **WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO (A)**, em 02/03/2022, às 10:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º,



caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Osires de Medeiros Melo Neto, Usuário Externo**, em 02/03/2022, às 11:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/03/2022, às 11:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES, PROFESSOR**, em 04/03/2022, às 09:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **2110099** e o código CRC **399DFCFF**.

AGRADECIMENTOS

Palavras não são suficientes para expressar meu sentimento de gratidão às pessoas que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho. O meu muito obrigado se estende a todas essas, citadas aqui ou não.

Deus, obrigado por ser meu combustível diário para seguir em frente e vencer todos os obstáculos que surgem no caminho.

Aos meus pais, Francinete e Charley, que sempre fizeram o possível e impossível para investir na minha educação, renunciando, muitas vezes, de sonhos para que eu chegasse até aqui. Minha gratidão e amor por vocês são imensuráveis. Obrigado por terem lutado e sonhado comigo.

Thâmara, obrigado por ser uma pessoa incrível que apoia minhas decisões e me dá forças quando me sinto cansado, sendo incentivo no meu crescimento pessoal. Obrigado por ser irmã e amiga. Te amo.

Gustavo, todo seu apoio durante a minha trajetória acadêmica me fez ser quem sou hoje. Obrigado pelo ser humano incrível, amigo e companheiro que não mede esforços para ajudar no meu crescimento pessoal e profissional.

Profa. Lêda, obrigado por me incentivar e orientar na realização desse trabalho. Todos os conhecimentos e apoio que tive nessa jornada foram enriquecidos com sua presença. Sua dedicação ao ensino e à pesquisa é inspiração para minha vida profissional. Meu muito obrigado.

Profa. Luciana, obrigado por todas as contribuições. Sou muito grato por todo conhecimento transmitido, pela paciência e pela sua amizade.

Profa. Ana Maria, minha amiga, obrigado por todos os conhecimentos, conselhos, amizade, oportunidades de crescimento acadêmico e todo apoio nessa caminhada. Não há palavras que eu possa usar para agradecer todo seu apoio.

Ingridy, um presente que a Pós-Graduação me deu. Obrigado por toda amizade, carinho, apoio e por toda sua dedicação à pesquisa. Sem você eu não teria conseguido. Sou grato por cada momento vivenciado em laboratório, por cada troca de conhecimento, por compartilhar aflições, medos e inseguranças.

Aos meus amigos que construí no mestrado, em especial a Amanda, Daniel, Robson Kel, Rita Flávia, Jucimara, Henrique, por todo companheirismo, troca de conhecimentos, apoio e amizade.

Aos amigos pessoais Flávia, Bervylly, Dilma, Juan, Miguel, Carmem Júlia, Moema, Li, William, Mateus, Anne, Jamily, muito obrigado por compartilharem comigo o lado bom da vida.

Aos professores da Pós-Graduação Adriano Elísio, John Kennedy, e Veruschka Escarião por todo conhecimento e apoio dado.

Igor e Arthur, obrigado por todo apoio e conhecimento de química. A vivência com vocês em laboratório enriqueceu minha formação acadêmica.

Aos meus familiares, em especial Vovó Terezinha, Tia Mere, Tia Neide e Tia Kelma, agradeço por todo apoio e incentivo no meu crescimento profissional. Amo todos vocês.

Aos membros da banca examinadora Prof. Lélío Brito e Prof. John Kennedy pelas enriquecedoras contribuições.

Aos funcionários do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) Ladjane, Joseildo e Jadilson, meus companheiros diários. Obrigado pela boa convivência.

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) por fornecer os meios para a realização da minha pesquisa.

À CAPES pela bolsa de estudos concedida.

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

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) por viabilizarem o curso de mestrado.

"Em algum lugar, alguma coisa incrível está esperando para ser descoberta."

Carl Sagan

RESUMO

A crescente demanda por matérias-primas e energia, e o aumento da população justificam o emprego da economia circular, que busca redução do impacto ambiental e ganhos econômicos. A utilização do pavimento asfáltico reciclado (*Reclaimed Asphalt Pavement* - RAP) na produção de misturas asfálticas a quente (*Hot Asphalt Mixtures* – HMA) tem sido empregada na pavimentação devido à escassez de materiais virgens. Entretanto, o emprego de percentuais elevados de RAP é condicionado à sua suscetibilidade a falhas sob baixas temperaturas e ao dano por fadiga. A adição de agentes rejuvenescedores pode restaurar parcialmente as propriedades envelhecidas do ligante recuperado. Nesse sentido, pesquisas que abordem análises com resíduos e subprodutos industriais são necessárias para trazer soluções que fomentem a tendência de se trabalhar numa perspectiva de economia circular, que é baseada na economia e na circulação de resíduos e subprodutos entre os diversos setores, inclusive a engenharia de pavimentação. Este trabalho avaliou o uso do ácido graxo da borra do óleo de soja (SSFA) como agente rejuvenescedor para misturas asfálticas recicladas, assim como analisou a viabilidade técnica, econômica e ambiental quanto à circularidade. Esta última, considerando o potencial de circularidade dos materiais. Na primeira etapa foi realizada a caracterização do ligante por meio de ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, *performance grade* (PG); antes e após o envelhecimento a curto prazo (RTFO), e *multiple stress creep recovery* (MSCR). A segunda etapa correspondeu à análise mecânica das misturas por meio dos ensaios de resistência à tração, suscetibilidade à umidade, módulo de resiliência, módulo dinâmico, fadiga e deformação permanente; na terceira etapa foi realizada uma análise de circularidade e na quarta etapa um estudo comparativo analisando o custo de produção dessas. Os resultados apontaram efeito rejuvenescedor do SSFA e este foi usado como modificador das misturas asfálticas recicladas com 40% de RAP em teores de 0, 3 e 5%. A adição do RAP melhorou a resistência à deformação permanente e o SSFA melhorou o desempenho à fadiga das misturas recicladas nos teores testados. As misturas asfálticas recicladas apresentaram os maiores índices de circularidade. A incorporação do RAP proporcionou redução de custos das misturas asfálticas e a adição do SSFA não acarretou aumento significativo. Portanto, as misturas recicladas se apresentaram mais viáveis tecnicamente, ambientalmente e economicamente que a mistura asfáltica tradicional, principalmente a mistura com 3% de SSFA.

Palavras-chave: Agente rejuvenescedor; Reologia; Desempenho mecânico; Custos; Índice de circularidade.

ABSTRACT

The growing demand for raw materials and energy, and the increase in population justify the use of the circular economy, which seeks to reduce environmental impact and economic gains. The use of recycled asphalt pavement (Reclaimed Asphalt Pavement - RAP) in the production of hot asphalt mixes (Hot Asphalt Mixtures - HMA) has been used in paving due to the scarcity of virgin materials. However, the use of high percentages of RAP is conditioned to its susceptibility to failure at low temperatures and to fatigue damage. The addition of rejuvenating agents can partially restore the aged properties of the recovered binder. Hence, researching industrial waste and by-products are necessary to bring solutions that foster the tendency to work from a circular economy perspective, which is based on the economy and the circulation of waste and by-products between different sectors, including road engineering. This work evaluated the use of soybean oil sludge fatty acid (SSFA) as a rejuvenating agent for recycled asphalt mixtures, as well as analyzed the technical, economic and environmental feasibility regarding the circularity of these materials. In the first step, the characterization of the binder was carried out through penetration tests, softening point, rotational viscosity, performance grade (PG); before and after short-term aging (RTFO), and multiple stress creep recovery (MSCR). The second stage corresponded to the mechanical analysis of the mixtures through tests of tensile strength, susceptibility to moisture, resilience modulus, dynamic modulus, fatigue, and permanent deformation; in the third stage an analysis of circularity was carried out and in the fourth stage a comparative study was carried out analyzing the cost of production of these. The results showed a rejuvenating effect of SSFA and it was used as a modifier of recycled asphalt mixtures with 40% RAP in levels of 0, 3 and 5%. The addition of RAP improved the resistance to permanent deformation and the SSFA improved the fatigue performance of the recycled mixtures at the tested grades. The recycled asphalt mixtures presented the highest circularity indexes. The incorporation of accruals increased as accrued SSFA costs did not increase the increase. Therefore, the recycled mixes were more technically, environmentally and economically viable than the traditional asphalt mix, especially the mix with 3% SSFA.

Keywords: Rejuvenating agent; Rheology; Mechanical performance; Costs; Circularity index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fresagem do revestimento asfáltico	25
Figura 2 - Reação de formação de um triglicerídeo	33
Figura 3 - Fluxograma do processo de refino dos óleos e gorduras.....	37
Figura 4 - Ciclo de vida genérico do pavimento	42
Figura 5 - Fluxograma geral do programa experimental	46
Figura 6 - Agregados e filer usados neste estudo: a) Brita 19 mm; b) Brita 12.5 mm; c) Areia; d) Pó de pedra; e) Cal	47
Figura 7 - Curvas granulométricas dos agregados naturais	48
Figura 8 - Processo de recuperação do ligante asfáltico no rotaevaporador: a) ligante asfáltico com tricloroetileno, b) tricloroetileno retirado do ligante, c) ligante asfáltico recuperado	50
Figura 9 - Curvas granulométricas dos agregados RAP.....	52
Figura 10 - Borra do óleo de soja: a) Reservatório para conservação da borra; b) Borra dentro do recipiente; c) Amostra da borra do óleo de soja para análise em laboratório	53
Figura 11 - FTIR da borra do óleo de soja.....	54
Figura 12 - Fluxograma das etapas do processo de acidulação da borra do óleo de soja.....	56
Figura 13 - Processo de acidulação: a) Borra do óleo de soja com ácido clorídrico em aquecimento e agitação; b) Fases após processo de acidulação; c) Funil de decantação para extração do ácido graxo; d) Obtenção do ácido graxo da borra do óleo de soja	57
Figura 14 - Curvas inferior, intermediária e superior, TMN = 19.0 mm	61
Figura 15- Definição do teor de RAP a ser adicionado na mistura asfáltica reciclada	64
Figura 16 – Faixa granulométrica da mistura asfáltica com 40%RAP, TMN = 19.0 mm	64
Figura 17 - Definição do fluxo de cálculo dos parâmetros do ICM.....	70
Figura 18 – Logística de produção das alternativas de misturas asfálticas analisadas.....	72
Figura 19 - Grau de desempenho dos ligantes asfálticos puro e modificados: a) PG, b) PG contínuo	84
Figura 20 - Parâmetro Módulo Complexo (G^*) em função da temperatura antes e após RTFO	86
Figura 21 - Índice de envelhecimento (AI) das amostras de ligante asfáltico	87
Figura 22 – Resultados do ensaio de tração por compressão diametral	89
Figura 23 - Resultados do dano por umidade induzida	91

Figura 24 – Resultados de módulo de resiliência.....	92
Figura 25 - Curvas mestras das misturas analisadas	94
Figura 26 - Módulo dinâmicos das misturas asfálticas: a) 4°C, b) 20°C, c) 40°C.....	95
Figura 27 - Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento: a) 4°C, b) 20°C, c) 40°C	96
Figura 28 - Valores do Flow Number obtidos pelo ensaio uniaxial de carga repetida	98
Figura 29 - Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões no centro do CP.....	100
Figura 30 - Número de ciclos até a ruptura versus deformação resiliente inicial	100
Figura 31 - Resultados do ICM das misturas asfálticas.....	105
Figura 32 - Custo de produção das misturas asfálticas analisadas	108
Figura 33 – Custo anual de recuperação das misturas asfálticas	110
Figura 34 - Custos das misturas asfálticas por km de rodovia.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados naturais	48
Tabela 2 - Caracterização do ligante asfáltico recuperado	51
Tabela 3 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados RAP	52
Tabela 4 – Resultados da caracterização da borra do óleo de soja	54
Tabela 5 – Caracterização do ligante asfáltico puro.....	58
Tabela 6 - Proporções de agregados para a mistura asfáltica de referência	61
Tabela 7 - Parâmetros volumétricos das misturas com teor de ligante inicial.....	62
Tabela 8 - Resumo dos parâmetros volumétricos da mistura de projeto.....	63
Tabela 9 - Proporções de agregados da mistura asfáltica reciclada	64
Tabela 10 - Parâmetros volumétricos da mistura com o teor de ligante de projeto da mistura asfáltica reciclada	65
Tabela 11 - Resultados empíricos físicos e reológicos dos ligantes asfálticos puro e modificados	80
Tabela 12 - Variação das temperaturas de PG e PG contínuo nas amostras dos ligantes asfálticos	85
Tabela 13 - Parâmetros obtidos no teste de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR)	88
Tabela 14 - Resumo das características das curvas de vida de fadiga das misturas	101
Tabela 15 - Resultados obtidos para a resistência à fadiga e à deformação permanente para as misturas asfáltica desse estudo.....	103
Tabela 16 - Entradas e saídas da quantificação do Índice de Circularidade do Material (ICM)	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Simbologia e nomenclatura sistemática e usual de ácidos graxos	35
Quadro 2 - Nomenclatura das amostras utilizadas na pesquisa	59
Quadro 3 - Composição base para a obtenção do custo da tonelada das misturas asfálticas	75
Quadro 4 - Composição de custo de produção das misturas asfálticas	107
Quadro 5 - Fluxo de caixa das misturas asfálticas	111
Quadro 6 - Ordem de viabilidade das misturas asfálticas	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AB	<i>Asphalt Binder</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	Índice de Envelhecimento
AMPT	<i>Asphalt Mixture Performance Test</i>
AOCS	<i>American Oil Chemists' Society</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CGS	Compactador Giratório SUPERPAVE
CP	Corpo de Prova
DHR	<i>Discovery Hybrid Rheometer</i>
DMT	Distância Máxima de Transporte
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
EC	Economia Circular
FN	<i>Flow Number</i>
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>
ICM	Índice de Circularidade do Material
ISC	Índice de Suscetibilidade Térmica
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducer</i>
MCDA-C	Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão Construtivista
MD	Módulo Dinâmico
ME	Ministério da Economia
MEC	Modelo Circular Econômico
MR	Módulo de Resiliência
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
NBR	Norma Brasileira
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i>
PG	<i>Performance Grade</i>
PIB	Produto Interno Brito
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RBV	Relação Ligante-Vazios
RCC	Resíduos da Construção Civil
RRT	Resistência Retida à Tração
RT	Resistência à Tração
RTFO	<i>Rolling Thin-Film Oven</i>
SDI	Secretaria de Desenvolvimento da Infraestrutura
SEPEC	Secretaria Especial de Produtividade Emprego e Competitividade
SSFA	<i>Soy Oil Sludge Fatty Acid</i>
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices
SS	<i>Soy Oil Sludge</i>

SUPERPAVE	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
TMN	Tamanho Máximo Nominal
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
VAM	Vazios no Agregado Mineral
VPL	Valor Presente Líquido
Vv	Volume de Vazios

LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta\sigma$	Diferença de tensões no centro do corpo de prova (MPa)
$^{\circ}\text{C}$	Grau celsius
$^{\circ}\text{C}/\text{min}$	Grau celsius por minuto
cm	Centímetro
cP	Centipoise
D	Diâmetro dos grãos
g	Gramma
Gmb	Massa específica aparente medida (g/cm^3)
Gmm	Densidade máxima medida (g/cm^3)
Hz	Hertz
Kg	Quilograma
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
Nprojeto	Número de giros de projeto no compactador SUPERPAVE
Nmáximo	Número de giros máximo no compactador SUPERPAVE
Ninicial	Número de giros inicial no compactador SUPERPAVE
rpm	Rotação por minuto
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
σ	Resistência à tração
η_a	viscosidade do ligante em uma dada condição de envelhecimento
η_o	viscosidade inicial do ligante asfáltico
T $^{\circ}\text{C}$	Ponto de amolecimento
Jnr	Complância não recuperável
G*	Módulo Complexo de Cisalhamento
s	Segundo
cm	Centímetro
%	Porcentagem
mmHG	Milímetro de Mercúrio
mL	Mililitro
PEN	Penetração
P/A	Relação pó/ligante asfáltico
N	Número de ciclos de carregamento que leva a amostra à ruptura
ϵ_i	Deformação resiliente inicial
L_{RAP}	Vida útil média real do produto final
L_{av}	Vida útil média real de um produto médio da indústria
N_{RAP}	Número de ciclos de carregamento antes da falha em termos de fadiga

N_{av}	Número equivalente de ciclos de carregamento de um produto médio da indústria de um tipo semelhante
P_{RAP}	Fração de matéria-prima derivada de fontes recicladas
F_{RAP}	Fração da massa do produto coletado por reciclagem no fim da vida.
$F(X)$	Fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas
E_T	Eficiência do processo de reciclagem como tratamento
E_P	Eficiência do processo de reciclagem como produção
ICM_{RAP}	Índice de circularidade de RAP
F	Número médio de ciclos de carregamento antes da falha por fadiga
F_{av}	Vida útil média real de uma mistura asfáltica convencional
DP	Número médio de ciclos de carregamento antes de atingir um valor específico de profundidade de sulco
DP_{av}	Número equivalente de ciclos de carregamento de uma mistura asfáltica convencional antes de atingir o mesmo valor de profundidade de sulco
t	Tonelada
m	Metro
km	Quilômetro
R\$	Reais

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1 OBJETIVOS	20
1.1.1 OBJETIVO GERAL.....	20
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS	21
2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS	24
2.3 USO DE AGENTES REJUVENESCEDORES EM MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS.....	27
2.3.1 ÓLEOS COMO AGENTES REJUVENESCEDORES	29
2.3.2 ÓLEO DE SOJA.....	32
2.3.3 ÁCIDOS GRAXOS	33
2.3.4 REFINO DO ÓLEO BRUTO DE SOJA.....	36
2.3.5 BORRA DO ÓLEO DE SOJA	37
2.4 USO DE RESÍDUOS NA INDÚSTRIA DA PAVIMENTAÇÃO E A ECONOMIA CIRCULAR.....	39
2.4.1 ECONOMIA CIRCULAR E MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS	41
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
3. MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1 MATERIAIS.....	47
3.1.1 AGREGADOS NATURAIS	47
3.1.2 RAP	49
3.1.3 BORRA DO ÓLEO DE SOJA	53
3.1.4 LIGANTE ASFÁLTICO.....	57
3.2 MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	60
3.2.1 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	60
3.2.2 ENSAIOS MECÂNICOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	65

3.3 ANÁLISE DE CIRCULARIDADE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	69
3.4 ANÁLISE ECONÔMICA.....	72
3.4.1 PRESSUPOSTOS	73
3.4.2 DETERMINAÇÃO DOS INVESTIMENTOS	74
3.4.3 DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS DE RECUPERAÇÃO	78
3.4.4 MÉTODO DE ANÁLISE.....	78
4. RESULTADOS	80
4.1 ANÁLISE EMPÍRICA FÍSICA E REOLÓGICA DO LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO	80
4.1.1 AVALIAÇÃO FÍSICA.....	80
4.1.2 ANÁLISE REOLÓGICA.....	83
4.2 ANÁLISE MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS	89
4.2.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	89
4.2.2 DANO POR UMIDADE INDUZIDA (<i>LOTTMAN</i>)	90
4.2.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	92
4.2.4 MÓDULO DINÂMICO	93
4.2.4 RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE (<i>FLOW NUMBER</i>).....	98
4.2.5 VIDA DE FADIGA	100
4.3 ANÁLISE DE CIRCULARIDADE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	103
4.4 ANÁLISE ECONÔMICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	106
4.4.1 DETERMINAÇÃO DOS INVESTIMENTOS	106
4.4.2 DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS DE RECUPERAÇÃO	109
4.5 VIABILIDADE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	113
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	114
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	114
5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	115
REFERÊNCIAS	116

1. INTRODUÇÃO

O modal rodoviário é o principal meio de transporte no Brasil e, portanto, tem um efeito considerável na economia do país. A construção de estradas constitui a maior fração do investimento total em infraestrutura (KANAZAWA, 2021); e os pavimentos rodoviários consomem aproximadamente 30% de recursos naturais e geram 25% de resíduos sólidos da indústria da construção em todo o mundo (BENACHIO *et al.*, 2020).

Os processos de extração, transporte e transformação de materiais naturais para construção de pavimentos consomem elevadas quantidades de energia, esgotam a base de recursos naturais e liberam substâncias nocivas ao meio ambiente (CELAURO *et al.*, 2015). Para atender a tendência global de economia circular e mudança do modelo linear de descarte de resíduos após o descomissionamento do projeto, há necessidade de transformação, reutilização e reciclagem dos resíduos de materiais de construção (BATOULI *et al.*, 2017). Isso reduzirá os resíduos de construção e conservará as matérias-primas naturais (AKHTAR; SARMAH, 2018).

Fatores como mau dimensionamento da estrutura do pavimento, execução inadequada, dosagem equivocada dos materiais, mau uso das vias ou até mesmo o envelhecimento natural das camadas de revestimento, acarretam atividades de manutenção, reparo e reconstrução da camada de revestimento, gerando quantidade significativas de resíduos asfálticos (FONSECA *et al.*, 2014). Esses resíduos asfálticos são provenientes do processo de fresagem da camada de revestimento asfáltico, processo de corte das camadas necessárias por uma fresadora, empregando movimento rotativo contínuo por meio de equipamento adotado de cortador giratório (DIB, 2013).

A fresagem de pavimentos asfálticos propicia um material de valor econômico e com propriedades físicas e mecânicas que podem ser introduzidas na composição de novas misturas asfálticas (CUNHA *et al.*, 2018). Este material é denominado de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), e seu uso como agregado na produção de novas misturas asfálticas oferece duas vantagens principais que são a redução do custo de construção do pavimento asfáltico e os benefícios ambientais decorrentes da redução da demanda por recursos não renováveis, como o ligante asfáltico e agregados, sendo uma das alternativas mais adequadas para alcançar a sustentabilidade (CHIU *et al.*, 2008; HUANG *et al.*, 2011; ANTHONISSEN *et al.*, 2017; DING *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2020). O emprego do RAP tem possibilitado reduzir os resíduos

gerados nos processos de reabilitação de pavimentos, promovendo a economia circular, propiciando benefícios econômicos e ambientais significativos (SANCHEZ-ALONSO, 2011; YANG *et al.*, 2015; VANDEWALLE *et al.*, 2020).

O ligante extraído do RAP normalmente tem rigidez para resistir à deformação permanente a altas temperaturas, entretanto, devido à elevada rigidez os tornam suscetíveis ao trincamento prematuro por fadiga. Portanto, há a necessidade de ligantes mais macios ou agentes de reciclagem adicionados para os tornar viáveis e resistentes à fadiga e ao trincamento prematuro (SEIDEL; HADDOCK, 2014). Os agentes rejuvenescedores atuam como modificadores de viscosidade, melhorando as propriedades de rigidez de baixa temperatura do ligante asfáltico recuperado. Contudo, podem ter efeito negativo na resistência à deformação permanente a altas temperaturas, sendo importante avaliar o tipo e o teor dos rejuvenescedores para equilibrar as propriedades características do RAP (ARÁMBULA-MERCADO *et al.*, 2018).

A incorporação de óleos como agentes rejuvenescedores tem sido estudada nos últimos anos. Óleos residuais têm ganhado grande visibilidade devido às propriedades químicas parecidas aos óleos virgens e à viabilidade ambiental como uma destinação adequada para esses resíduos. Os óleos usados podem ser categorizados de forma diferente de acordo com seus constituintes e origem. Entre os diferentes tipos de óleos residuais destacam-se os óleos de motor e de cozinha, investigados por vários pesquisadores (DEVULAPALLI; KOTHANDARAMAN; SARANG, 2019; LI *et al.*, 2019; TAHERKHANI; NOORIAN, 2019; ZHANG *et al.*, 2020a; ZIARI *et al.*, 2019; XINGYU; RUIKUN; NAIPENG, 2020).

A borra do óleo de soja é o principal subproduto da indústria de refino de óleo de soja e é produzida durante a etapa de neutralização do refino químico do óleo bruto, onde os ácidos graxos livres presentes no óleo são neutralizados por meio da adição de solução de álcalis, resultando em sabões. Esta borra, devido ao seu alto conteúdo de ácidos graxos saponificados, pequeno valor econômico e grande disponibilidade nas indústrias de óleo de soja e de biodiesel, é uma opção de matéria-prima sustentável para a diminuição da viscosidade de ligantes asfálticos (SEIDEL; HADDOCK, 2014).

Seidel e Haddock (2014) realizaram um estudo reológico do ligante asfáltico modificado com a borra do óleo de soja acidulada (ácido graxo da borra do óleo de soja após processo de acidulação), e constataram que o material altera a suscetibilidade térmica (sensibilidade da consistência dos ligantes asfálticos à variação de temperatura), ou seja, o modificador age como

um redutor de rigidez e viscosidade. Segundo dados da Statista 2021 (SHAHBANDEH, 2021), o óleo de soja ocupa o segundo lugar em nível de produção mundial, correspondendo a 60.27 milhões de toneladas nos anos de 2020 a 2021, ficando atrás apenas do óleo de palma.

A literatura apresenta estudos com o óleo de cozinha residual (pós-consumo) como agente rejuvenescedor (SUN *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2021; YAN *et al.*, 2021), mas há lacunas acerca do emprego de materiais residuais do processo industrial de refinamento do óleo de soja como agente rejuvenescedor. A borra do óleo de soja é um subproduto do processo de refinamento do óleo de soja, e o ácido graxo da borra do óleo de soja é derivado desse subproduto. Há limitações nos estudos físico-reológicos de ligantes asfálticos modificados por esses materiais e não há pesquisas abordando avaliação técnica, econômica e ambiental de misturas asfálticas recicladas produzidas com esses ligantes modificados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa objetivou avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental de misturas asfálticas recicladas produzidas com alto teor de RAP e com agente rejuvenescedor derivado da borra do óleo de soja.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar os efeitos físico-reológicos nas propriedades do ligante asfáltico modificado pela borra do óleo de soja e o ácido graxo da borra do óleo de soja.
- Mensurar os efeitos da adição do modificador sobre as propriedades mecânicas das misturas asfálticas recicladas.
- Avaliar a viabilidade econômica do emprego do RAP comparativamente às misturas asfálticas tradicionais.
- Analisar o potencial de circularidade do RAP na produção de misturas asfálticas recicladas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo reúne informações, coletadas em publicações correntes, a respeito dos assuntos abordados. A priori, faz-se uma abordagem sobre os ligantes asfálticos e misturas asfálticas recicladas com agentes rejuvenescedores, introduzindo estudos sobre a borra do óleo de soja e a temática de viabilidade econômica e ambiental na produção destas misturas.

2.1 REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

O ligante asfáltico é o principal material do revestimento asfáltico e um importante material impermeabilizante (YUAN *et al.*, 2021). Este é um produto à base de petróleo que possui baixa recuperação elástica quando submetido a diferentes tensões, gerando deformações plásticas devido à sua natureza viscoelástica (LAGOS-VARAS *et al.*, 2020). Na mistura asfáltica a importância do ligante se deve principalmente à função aglomerante e impermeabilizante, garantindo a ligação com os agregados, com o objetivo de evitar a separação provocada pelo efeito do tráfego, e impedindo a entrada de água que pode comprometer toda a estrutura do pavimento (SOBREIRO, 2014).

O envelhecimento dos ligantes asfálticos afeta a vida útil dos pavimentos asfálticos (MIRÓ *et al.*, 2015), pois estes se tornam duros e quebradiços, e conseqüentemente sujeitos à fadiga e danos térmicos sob cargas de tráfego e condições térmicas (CONG *et al.*, 2020). Este processo nos ligantes asfálticos ocorre em duas etapas: a primeira durante as fases de estocagem, espalhamento e compactação da mistura, enquanto a segunda ocorre durante a utilização do pavimento, devido ao contato com oxigênio, radiação UV e variações de temperatura ao longo do tempo. Essas etapas são denominadas, respectivamente, por envelhecimento a curto e a longo prazo.

O envelhecimento a curto prazo ocorre pelo processo de mistura e agitação durante a produção e usinagem das misturas asfálticas e o processo de implantação do revestimento asfáltico no campo devido às altas temperaturas e fluxo de ar envolvido nestes processos, ocorrendo a volatilização de parte dos óleos presente no ligante. Em laboratório, este envelhecimento é simulado utilizando a Estufa de Filme Fino Rotativa (RTFO) segundo a norma AASHTO T 240:2021. O outro envelhecimento ocorre após execução da camada de revestimento sujeita a temperaturas ambientes inferiores às temperaturas dos processos anteriores. Entretanto, a camada apresentará maior área de contato devido ao espalhamento,

ficando mais exposta aos agentes oxidativos, ocorrendo a modificação das frações químicas dos ligantes asfálticos. Em laboratório, a simulação deste envelhecimento dá-se por meio do Vaso de Pressão de Envelhecimento (*Pressure Aging Vessel - PAV*) segundo a norma AASHTO R 28-12:2016.

A mistura asfáltica a quente é o material rodoviário mais aplicado em pavimentos em todo o mundo (NASKAR *et al.*, 2013; YAO *et al.*, 2018). Durante o processo de fabricação, tanto os agregados quanto o ligante devem ser aquecidos a temperaturas em torno de 150 a 200°C, com intuito que o ligante possua viscosidade capaz de produzir uma mistura homogênea encobrendo todos os agregados e, requerendo um alto consumo de energia (SALES, 2015).

O pavimento flexível apresenta um desempenho satisfatório quando proporciona conforto e segurança ao rolamento dos veículos, durabilidade, resistência às cargas, deformações, fraturas e desagregações, sem se tornar instável ao tráfego e às condições climáticas. As misturas asfálticas estão sujeitas à deformação elástica, viscoelástica, plástica e visco-plástica sob carregamento (PERL; UZAN; SIDES, 1983). O desempenho do pavimento é amplamente determinado pelas características de seus constituintes: agregados, ligantes asfálticos e aditivos.

Com o tempo, pavimentos deteriorados requerem conservação e reabilitação. Quando o pavimento está extremamente danificado, a solução geralmente é a reconstrução total com misturas asfálticas a quente. Tradicionalmente, misturas asfálticas, compostas de agregados e ligante asfáltico, são produzidas em altas temperaturas, geralmente em torno de 160°C. A reciclagem de pavimentos é uma técnica que preserva materiais naturais, pois minimiza o uso de agregados naturais e ligantes de hidrocarbonetos de origem petrolífera, evitando a geração de resíduos e a ocupação de aterros (FLORES *et al.*, 2020).

A principal causa dos defeitos estruturais em pavimentos flexíveis são as ações do tráfego ao longo dos anos de serviço. Elas provocam deformações que podem ser recuperáveis ou permanentes (BARROS, 2020). Durante um longo período, atribuiu-se a causa do trincamento da camada de revestimento dos pavimentos flexíveis às excessivas deformações plásticas observadas nas camadas granulares abaixo desta. Entretanto, verificou-se que as trincas são resultado, predominantemente, de elevadas deflexões reversíveis a que os pavimentos são submetidos repetidamente, que não são necessariamente acompanhadas de deformações plásticas (SANTOS, 2005).

A trinca por fadiga é um tipo comum de defeito que ocorre no pavimento asfáltico. Existem dois tipos de trincas por fadiga: trincas coesivas (que ocorrem dentro de um ligante asfáltico) e trincas adesivas (que ocorrem na interface ligante asfáltico) (HINTZ; BAHIA, 2013). A resistência à trinca por fadiga do ligante asfáltico determina seu desempenho à fadiga (CHEN; BAHIA, 2021), e a avaliação da resistência à fadiga tem sido um dos tópicos mais investigados nos materiais asfálticos até hoje. Sob carregamento repetido, o processo de fadiga do ligante asfáltico passa por três estágios distintos: iniciação de trinca, propagação de trinca constante e propagação de trinca instável (SHI *et al.*, 2021).

As propriedades do ligante asfáltico têm forte influência na resistência à fadiga da mistura asfáltica, e o desempenho à fadiga tem ganhado visibilidade nos estudos de misturas asfálticas (SOENEN; LA ROCHE; REDELIUS, 2013; SAFAEI; CASTORENA; KIM, 2016; ZHANG; OESER, 2021). A trinca por fadiga ocorre quando o pavimento está no fim de sua vida útil e os ligantes asfálticos estão rígidos e é caracterizada por uma fissuração associada à carga resultante de carregamentos repetitivos. Portanto, subentende-se que as deformações de tração horizontais na parte inferior da camada do pavimento excederam a propriedade de resistência à tração do pavimento, o que ocasiona microfissuras (BROWN *et al.*, 2009; RAHBAR-RASTEGAR, 2017). Essas trincas se propagam formando microfissuras que aumentam de comprimento e largura formando trincas do tipo couro de jacaré (BROWN *et al.*, 2009; DEEF-ALLAH; ABDELRAHMAN, 2019).

Outro defeito comum nos revestimentos asfálticos é a deformação permanente, que pode ser responsável por mais de 80% dos danos iniciais, como irregularidade e afundamentos na camada de revestimento (LU; ZHANG; SUN, 2012). A deformação acumulada na camada de revestimento asfáltico é uma das principais deteriorações nas misturas asfálticas que ocorrem em altas temperaturas (AMELI *et al.*, 2020). O surgimento de deformações permanentes na camada de revestimento afeta o conforto dos usuários e aumenta o risco de aquaplanagem em dias de chuva, reduzindo a segurança no trânsito. Em locais de clima tropical, como no Brasil que apresenta altas temperaturas e chuvas intensas, a presença da umidade atrelada ao elevado volume de tráfego acelera o aparecimento desse dano (ZHANG; XIE; ZHAO, 2021).

A deformação permanente em altas temperaturas (ou ainda, temperaturas médias em regiões tropicais) é um dos principais modos de desgaste de pavimentos asfálticos. Esta é resultado do acúmulo de pequenas quantidades de deformação plástica como resultado da repetição de cargas de tráfego na estrutura do pavimento (AKSOY; ISKENDER, 2008;

IMANINASAB; BAKHSHI, 2015). A deformação pode ocorrer em todas as camadas da estrutura do pavimento flexível e resulta da distorção lateral e densificação. Além disso, representa um acúmulo contínuo de deformações permanentes incrementalmente pequenas de cada aplicação de carga (LEAHY, 1989; GARBA, 2002).

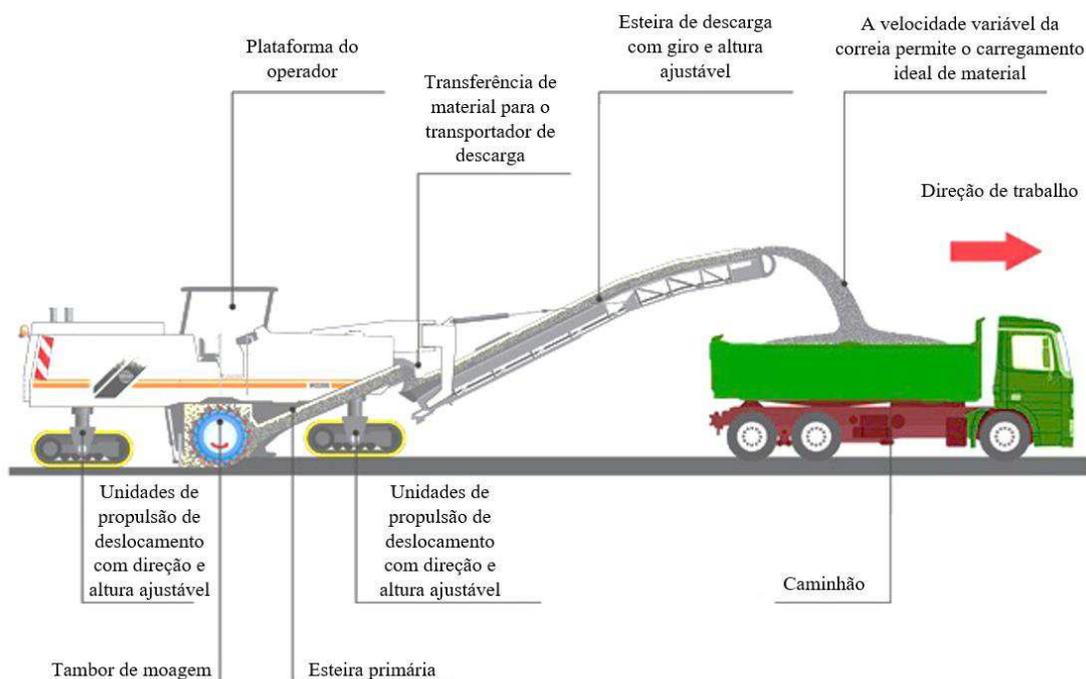
O ligante asfáltico e suas características termomecânicas são os que mais influenciam no aparecimento de deformações permanentes em misturas asfálticas (PERRATON *et al.*, 2010; RADZISZEWSKI *et al.*, 2019). A literatura tem buscado ao longo dos anos um parâmetro funcional (para o ligante asfáltico) que pudesse caracterizar seu efeito nas deformações permanentes de misturas asfálticas (MANGIAFICO *et al.*, 2018).

2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

No âmbito da pavimentação, o ligante asfáltico é um dos materiais mais importantes e versáteis do mundo, além de ser também um dos mais antigos. Todavia, fatores como mau dimensionamento da estrutura do pavimento, execução inadequada, dosagem equivocada dos materiais, mau uso das vias ou até mesmo o envelhecimento natural das camadas de revestimento, acarretam atividades de manutenção, reparo e reconstrução da camada de revestimento, gerando quantidade significativas de resíduos asfálticos (FONSECA *et al.*, 2014).

Na reciclagem de pavimentos asfálticos utiliza-se o RAP para produzir novas misturas a serem aplicadas como camada de revestimento. Os elementos principais das misturas recicladas são os agregados fresados (agregados envoltos por ligante asfáltico oxidado), que podem ser empregados em teores variados e até de forma integral, sem qualquer adição de material virgem. Segundo Dib (2013) fresagem é um processo de usinagem no qual a remoção de material da peça se realiza de modo intermitente, pelo movimento rotativo da ferramenta que geralmente é multicortante, assim, é possível gerar superfícies das mais variadas formas. A Figura 1 apresenta o processo de fresagem do revestimento asfáltico em campo.

Figura 1 - Fresagem do revestimento asfáltico



Fonte: Adaptado de Arrow Road Construction Healy Asphalt Company, LLC (2021)

A fresagem de pavimentos asfálticos propicia um material de valor econômico e com propriedades físicas e mecânicas que podem ser introduzidas na composição de novas misturas asfálticas (CUNHA *et al.*, 2018). Kuehl *et al.* (2016) apontam vantagens ao inserir o RAP na produção de novas misturas asfálticas como conservação de recursos naturais e redução de custos na fabricação de misturas asfálticas a quente.

No processo de reciclagem a quente, a antiga camada de revestimento asfáltico é fresada, processada e combinada com novo ligante virgem, agregado e/ou agente de reciclagem na usina de misturas asfálticas. A fresagem remove uma ou mais camadas de uma superfície de pavimento existente (GUNGAT *et al.*, 2019). Ao usar RAP na construção de rodovias, ele deve atender aos requisitos de materiais virgens e seu desempenho deve ser igual ou superior à mistura convencional comumente utilizada. As propriedades de misturas asfálticas com elevado teor de RAP, valores acima de 30%, podem ser melhoradas introduzindo um ligante mais macio e incorporando rejuvenescedores (SONG; HUANG; SHU, 2018).

O envelhecimento do ligante asfáltico o torna mais rígido, mais quebradiço e, portanto, mais suscetível a danos por fadiga devido ao tráfego e às cargas térmicas (BAGHAE

MOGHADDAM; BAAJ, 2016). Os agentes rejuvenescedores atuam como modificadores de viscosidade, melhorando as propriedades de rigidez de baixa temperatura do ligante asfáltico recuperado. Contudo, podem ter efeito negativo na resistência à deformação permanente a altas temperaturas, sendo importante avaliar o tipo e o teor dos rejuvenescedores para equilibrar as propriedades características do RAP (ARÁMBULA-MERCADO *et al.*, 2018). Melo Neto *et al.* (2020) apresentaram em seu estudo uma análise da literatura a respeito de pesquisas utilizando material fresado (RAP) como agregado em percentuais acima de 30% e concluíram-se que é possível projetar misturas asfálticas com desempenho mecânico à fadiga e deformação permanente igual e até superior às misturas asfálticas convencionais, atendendo aos critérios volumétricos especificados em norma.

Cunha *et al.* (2018) investigaram o desempenho de misturas asfálticas com incorporação de 50 e 100% de RAP. As misturas foram produzidas com teores de 2.5 e 4.5% de ligante asfáltico virgem. A pesquisa aponta resultados de estabilidade, fluência e resistência à tração por compressão diametral para camadas de rolamento semelhantes aos obtidos com as misturas asfálticas convencionais. Misturas asfálticas que incorporam RAP são geralmente mais rígidas e quebradiças em comparação com misturas asfálticas virgens, tendendo a uma maior resistência à deformação permanente, mas maior suscetibilidade a trincas (COPELAND, 2011; MOGAWER *et al.*, 2012). Em uma tentativa de mitigar a rigidez e suscetibilidade a trincas da mistura asfáltica reciclada com percentual de RAP acima de 30% é recomendado o uso de ligantes virgens mais macios (ou seja, ligantes modificados com agentes rejuvenescedores) com viscosidade relativamente mais baixa que os ligantes comumente utilizados. No entanto, mesmo quando um ligante modificado é empregado, a mistura resultante ainda pode ser muito quebradiça, especialmente se o RAP utilizado for muito envelhecido ou se sua proporção na mistura for elevada. Portanto, o emprego de um ligante asfáltico modificado por agente rejuvenescedor pode restaurar a rigidez e o ângulo de fase da mistura, especialmente em misturas com uma alta quantidade de RAP (ARÁMBULA-MERCADO *et al.*, 2018).

Segundo Melo Neto *et al.* (2020) é importante a dosagem adequada da mistura asfáltica reciclada devido à variação nas propriedades do RAP. O aumento da temperatura no processo de usinagem leva a um maior consumo de energia, o que gera um impacto negativo ao meio ambiente, mas as temperaturas de mistura e compactação podem ser reduzidas à medida que agentes rejuvenescedores são adicionados à mistura asfáltica reciclada.

2.3 USO DE AGENTES REJUVENESCEDORES EM MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

O ligante asfáltico presente no RAP pode ser oxidado e apresentar aumento de rigidez e maior fragilidade em razão da alta temperatura durante a produção e exposição a longo prazo ao ar e à luz solar durante a vida útil (STIMILLI *et al.*, 2017). A fim de restaurar as propriedades reológicas do ligante asfáltico envelhecido e manter as propriedades de serviço da reciclagem de mistura asfáltica a quente, é necessário um processo para rejuvenescer o ligante envelhecido presente no RAP (REYES-ORTIZ *et al.*, 2012). O desempenho mecânico das misturas asfálticas recicladas com agentes rejuvenescedores depende principalmente do tipo e da dosagem do rejuvenescedor. A literatura tem apresentado que a dosagem do rejuvenescedor (teores empregados na modificação do ligante) afeta significativamente o desempenho (nível de redução da rigidez) da mistura asfáltica (CASEY *et al.*, 2008; ZAUMANIS *et al.*, 2014; DOKANDARI *et al.*, 2017).

A sobredosagem de rejuvenescedor aumentará a flexibilidade das misturas podendo comprometer a resistência à deformação permanente, enquanto a subdosagem aumentará a rigidez aumentando a suscetibilidade ao trincamento por fadiga. Portanto, a dosagem ideal de rejuvenescedor é necessária para produzir uma mistura estável (com flexibilidade e rigidez moderadas). Casey *et al.* (2008) e Ma *et al.* (2015) relataram que os rejuvenescedores alteram o grupo funcional do ligante envelhecido, o que melhora o desempenho quanto à fadiga. Nos últimos anos, os rejuvenescedores foram investigados para caracterizar a viabilidade de aumento do percentual de RAP na produção de misturas asfálticas recicladas. Do ponto de vista da composição química, o rejuvenescedor é incorporado para complementar a perda de componentes leves durante o processo de envelhecimento, que por sua vez recupera o comportamento coloidal e as propriedades reológicas do ligante envelhecido.

Uma maneira de rejuvenescer o RAP é o uso de ligantes asfálticos virgens mais macios (LIU *et al.*, 2015; MOGAWER *et al.*, 2016; REN *et al.*, 2020). No entanto, esta metodologia é eficaz apenas em teores abaixo de 30% de RAP (e requer grande quantidade de ligante asfáltico (AL-QADI *et al.*, 2012; MOLLENHAUER; GASPARELLO, 2012; WEST *et al.*, 2015). O uso de rejuvenescedores não restaura necessariamente a composição inicial do ligante (ou microestrutura) que poderia ser alcançada por meio de uma manipulação e/ou modificação química mais complexa (LOISE *et al.*, 2020). Em vez disso, é uma adição de óleos de baixo peso molecular que restaura a fração de maltenos, diminui a viscosidade e aumenta a mobilidade molecular (KARLSSON; ISACSSON, 2003; TABATABAEE; KURTH, 2017;

LOISE *et al.*, 2019). Ao contrário dos ligantes macios, os rejuvenescedores podem potencialmente permitir, mediante o uso adequado e peças adequadas de maquinários, a produção de misturas asfálticas recicladas com maiores teores de RAP (ZAUMANIS; MALLICK, 2013; ZAUMANIS *et al.*, 2014; WEST; COPELAND, 2015; ZAUMANIS *et al.*, 2019).

Os rejuvenescedores têm diferentes origens e composições químicas, como óleos aromáticos, parafínicos, vegetais ou derivados de óleo, como, por exemplo, o biodiesel (SHEN *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2012; EPPS MARTIN *et al.*, 2019; KASEER *et al.*, 2019). Os bio-rejuvenescedores e rejuvenescedores derivados da reciclagem de resíduos estão progressivamente ganhando atenção graças ao seu desempenho e sustentabilidade, uma vez que reciclam produtos que não contêm componentes aromáticos cancerígenos, tornando seu uso mais seguro e possivelmente mais econômico (ZARGAR *et al.*, 2012; HAJJ *et al.*, 2013; WEN *et al.*, 2013; JI *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2018; JALKH *et al.*, 2018; TAHERKHANI; NOORIAN, 2018; EL-SHORBAGY *et al.*, 2019; SOTOODEH-NIA *et al.*, 2019).

Zaumanis *et al.* (2014) analisaram o rejuvenescimento de misturas 100% recicladas, modificadas com o teor de 12% de seis rejuvenescedores, sendo eles óleo vegetal residual, gordura vegetal residual, óleo orgânico, óleo destilado, resíduo de extrato aromático e óleo de motor. O uso dos rejuvenescedores alcançou a temperatura exigida de baixo grau de desempenho (-22°C), e reduziu a temperatura de alto grau de desempenho contínuo do ligante asfáltico recuperado, sendo a redução de 23.4, 23.4, 22.3, 21.3, 17.1 e 17.1% em relação ao ligante asfáltico recuperado não modificado, respectivamente. Zhang *et al.* (2020b) desenvolveram um estudo com cinco agentes rejuvenescedores (composto de óleo aromático, plastificante e agente anti-remoção) com diferentes viscosidades (variando o teor de agente rejuvenescedor em 8, 10, 12, 14 e 17%) em ligantes asfálticos recuperados. A adição dos rejuvenescedores acarretaram no aumento do grau de penetração em até 252.5% com uso de 14% de agente rejuvenescedor em relação ao ligante asfáltico recuperado não modificado, e redução da temperatura do ponto de amolecimento em até 23.4% com 12% de agente rejuvenescedor.

Zhang *et al.* (2020c) analisaram o desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas com alto teor de RAP, 40% e 60%, e rejuvenescedores autodesenvolvidos com óleo aromático, plastificante e antideslizante em teores de 10 e 12% por peso do ligante asfáltico. A pesquisa apontou que a viscosidade dos rejuvenescedores influencia no comportamento da

mistura asfáltica. Sugere-se que o rejuvenecedor com viscosidade relativamente mais baixa é mais adequado para misturas recicladas com alto teor de RAP, como o ácido graxo oriundo da borra do óleo de soja. A adição de rejuvenescedores melhorou a resistência à fissuração a baixas temperaturas, um ganho de 32 e 37.6% para as misturas recicladas com 40% de RAP e com 10 e 12% de rejuvenecedor, respectivamente; e um ganho de 40 e 31.5% para as misturas recicladas com 60% de RAP e com 10 e 12% de rejuvenecedor, respectivamente.

2.3.1 ÓLEOS COMO AGENTES REJUVENESCEDORES

A rigidez do RAP devido ao envelhecimento é consequência do constituinte alterado, ou seja, proporção de asfaltenos para maltenos no ligante asfáltico (MAMUN; ARIFUZZAMAN; TAHA, 2018). A adição de elevados teores de RAP pode levar a uma mistura mais rígida e, posteriormente, a uma fratura prematura do revestimento asfáltico (MOGAWER *et al.*, 2012). Assim, a utilização de RAP em novas misturas asfálticas requer o rejuvenescimento das propriedades perdidas. Esse rejuvenescimento é feito, em sua maioria, pela adição de um produto químico (agente de reciclagem) que neutraliza o constituinte alterado do ligante envelhecido (LINS *et al.*, 2008). O uso de RAP com agentes rejuvenescedores na construção do pavimento asfáltico leva à economia em despesas com materiais virgens, menor emissão de carbono, menor consumo de energia necessária na produção das misturas asfálticas recicladas, entre outros benefícios (ZAUMANISA; MALLICKA; FRANKB, 2014; GIANI *et al.*, 2015; JAHANBAKHSI *et al.*, 2020).

A incorporação de óleos como agentes rejuvenescedores tem sido estudada nos últimos anos. Óleos residuais têm ganhado grande visibilidade devido às propriedades químicas parecidas aos óleos virgens e à viabilidade ambiental como uma destinação adequada para esses resíduos. Os óleos usados podem ser categorizados de forma diferente de acordo com seus constituintes e origem. Entre os diferentes tipos de óleos residuais destacam-se os óleos de motor e de cozinha, investigados por vários pesquisadores (DEVULAPALLI; KOTHANDARAMAN; SARANG, 2019; LI *et al.*, 2019; TAHERKHANI; NOORIAN, 2019; ZHANG *et al.*, 2019; ZIARI *et al.*, 2019; XINGYU; RUIKUN; NAIPENG, 2020).

Rejuvenescedores são recomendados para melhorar a composição química e reologia do ligante oxidado proveniente do RAP tentando restaurar suas propriedades iniciais (PRADYUMMA; JAIN, 2016). O processo de envelhecimento leva à redução progressiva da porção aromática e ao aumento correspondente dos componentes do asfalteno no ligante

(LESUEUR, 2009; LU E ISACSSON, 2012). Para contrabalançar essa modificação, os rejuvenescedores são geralmente formados por compostos contendo óleos residuais como óleo de cozinha residual e óleo de motor residual (MAZZONI *et al.*, 2018).

Ultimamente, a literatura tem dado foco no desenvolvimento de ligantes asfálticos alternativos a partir da biomassa para a construção de pavimentos asfálticos flexíveis (GAO *et al.*, 2018, WANG *et al.*, 2018). Os bio-óleos são geralmente aplicados na indústria de ligantes asfálticos como modificadores (teor abaixo de 10% em substituição ao ligante asfáltico), extensores (teor de 25 a 75% de substituição ao ligante asfáltico) e substituintes (teor de 100% de bioóleos ao invés do ligante asfáltico) (HE *et al.*, 2017).

Os aditivos orgânicos têm hidrocarbonetos de cadeia longa que fornecem valores de baixa viscosidade em altas temperaturas quando adicionados a ligantes asfálticos. Os aditivos químicos facilitam o umedecimento do agregado particulado, modificando e controlando o atrito interno da mistura, o que melhora a interação dos componentes constituintes da mistura asfáltica (FERROTTI *et al.*, 2017).

Estudos (KROL *et al.*, 2016; JIMENEZ DEL BARCO-CARRION *et al.*, 2017; LEI *et al.*, 2017) apontam o potencial dos bio-óleos (óleos vegetais) para serem usados como rejuvenescedores em misturas asfálticas contendo RAP por diminuir o efeito do aumento da rigidez devido à presença dos materiais envelhecidos no ligante oxidado do RAP, e também em misturas com ligantes envelhecidos, restaurando de forma significativa as propriedades oxidativas do ligante envelhecido (ZHU *et al.*, 2017).

Pradhan e Sahoo (2020) realizaram uma pesquisa com misturas asfálticas recicladas modificadas com óleo da *Calophyllum inophyllum* a 5%, este óleo contém diferentes ácidos graxos como palmítico (12%), esteárico (12.86%), oléico (34.12%), linoléico (38.32%) e linolênico (0.28%). Os resultados apontaram por meio da análise termogravimétrica que o ligante rejuvenescido é estável até 230 °C, ou seja, o ligante permanece estável nos processos de produção e compactação das misturas asfálticas (realizados em temperaturas abaixo de 230°C). Os resultados também inferiram que até 60% de RAP podem ser incorporados com sucesso à mistura asfáltica a quente com a adição de um ligante asfáltico mais macio ou um agente rejuvenescedor, pois apresentaram resultados de ensaios mecânicos semelhantes ao da mistura asfáltica convencional.

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

Guerra (2020) avaliou o ligante asfáltico classificado com penetração 50/70 modificado por óleo de canola em teores de 1, 2 e 3% por peso de ligante. O teor de 3% apresentou resultados mais significativos: aumento da penetração de 86.90% e 44.44%, diminuição do ponto de amolecimento de 6.00% e 7.65%, e redução da viscosidade de 22.12% e 25.36% na temperatura de 135°C, antes e após o envelhecimento a curto prazo (RTFO), respectivamente. A redução das temperaturas de mistura e compactação foi da ordem de 3.4% e 3.2% para o teor de 3%, respectivamente. Moraes (2018) incorporou cera de carnaúba em teores de 1, 2 e 3% ao ligante asfáltico classificado com penetração 50/70 a fim de investigar a redução de viscosidade e consequentemente as temperaturas de mistura e compactação. À medida que se aumentou o teor do aditivo maior foi a redução de viscosidade. Na temperatura de 135°C houve redução de 23.67% e 26.55%, a 150°C diminuição de 24.38% e 22.65%, e a 177°C 19.18% e 21.04%, para o teor de 3% antes e após RTFO, respectivamente. A redução da temperatura de mistura foi de 5.73% e de compactação foi de 4.89% para o teor de 3%.

O óleo de tungue é um tipo de óleo vegetal que foi investigado como um potencial rejuvenescedor. Yan *et al.* (2020) investigaram as propriedades físicas, reológicas e grupos funcionais do ligante asfáltico envelhecido rejuvenescido pelo óleo de tungue em teores de 2, 4, 6 e 8%. Os resultados experimentais mostraram comportamento linear em relação ao grau de penetração e ao ponto de amolecimento, ou seja, à medida que aumentou o teor de óleo maior foi a penetração obtida e menor o ponto de amolecimento. A adição de 8% do óleo acarretou um aumento de 192.6% no grau de penetração e uma redução de 28% no ponto de amolecimento em relação ao ligante sem o aditivo. As amostras em todos os teores testados apresentaram uma redução na viscosidade e rigidez do ligante envelhecido após a incorporação do agente rejuvenescedor. No entanto, como a mistura asfáltica é um sistema complexo e a interação entre o ligante recuperado e os agregados ainda não é totalmente compreendida, ainda é necessário investigar o desempenho de misturas asfálticas utilizando ligante asfáltico recuperado rejuvenescido por óleo vegetais (FAN, 2019).

Seidel e Haddock (2014) investigaram as propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados com ácidos graxos da borra do óleo de soja (em teores de 1 e 3%), fonte de ácidos graxos da soja de custo relativamente baixo e altamente concentrada. Os testes de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional apontaram que à medida que incorpora maiores teores de ácidos graxos, os ligantes se tornam menos rígidos e suas viscosidades em altas temperaturas são reduzidas. Contudo, a literatura apresenta uma lacuna na investigação desses ácidos graxos como agentes rejuvenescedores de misturas asfálticas recicladas, sendo de grande

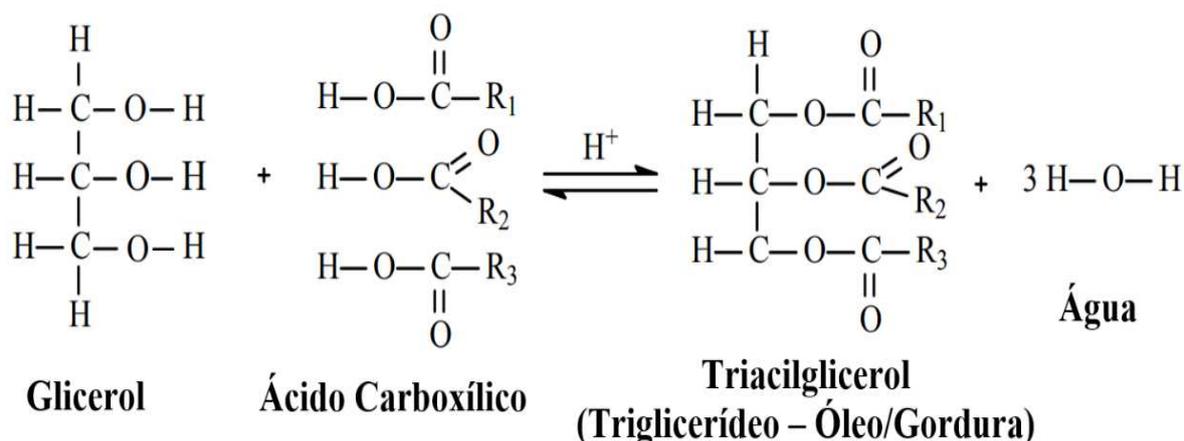
importância investigar os efeitos desse aditivo na resistência à fadiga e na suscetibilidade à umidade.

2.3.2 ÓLEO DE SOJA

O óleo de soja é extraído da semente de soja e é utilizado como fonte de alimento e com as novas tecnologias também pode ser usado como biocombustível. A soja (*Glycine max* (L) *Merrill*) pertence à família das leguminosas, plantas cuja semente encontra-se dentro de vagens. Visentainer e Franco (2006) apontam que as gorduras e os óleos são ésteres formados a partir de ácidos graxos e glicerol. Estes ésteres são frequentemente denominados de glicerídeos, triglicerídeos e triglicérides. Outro nome, triacilgliceróis, está diretamente ligado à constituição da estrutura molecular, ou seja, um triacilglicerol resulta da substituição dos átomos de hidrogênio da hidroxila da molécula de glicerol por três grupos acila. Os triacilgliceróis são os principais combustíveis da maioria dos organismos, na verdade, uma das mais importantes formas de armazenamento de energia química.

A Figura 2 apresenta a estrutura de um triacilglicerol, que é o produto da reação de uma molécula de glicerol com três moléculas de ácidos graxos, resultando três moléculas de água e uma molécula de triacilglicerol. Quando os três ácidos graxos são idênticos, o produto é um triacilglicerol simples. Da Fré (2009) aponta que as gorduras e óleos não são triacilgliceróis simples, pois contêm ácidos graxos distribuídos ao acaso em moléculas de triacilgliceróis diferentes. Por sua vez, os monoacilgliceróis e diacilgliceróis contêm, respectivamente, um e dois ácidos graxos combinados, e têm dois e um grupos hidroxila livre. Eles não ocorrem naturalmente em apreciáveis quantidades, exceto em gorduras e óleos que tenham sofrido hidrólise parcial.

Figura 2 - Reação de formação de um triglicerídeo



Fonte: Adaptado de Da Fré (2009)

Os óleos e gorduras são substâncias insolúveis em água (hidrofóbicas), de origem animal, vegetal ou mesmo microbiana. Gorduras e óleos apresentam substâncias que podem ser reunidas em duas grandes categorias: glicerídeos e não-glicerídeos. Os ácidos graxos livres, componentes naturais dos óleos e gorduras, ocorrem em quantidades geralmente pequenas. O feijão soja (*glycine max*) é um dos mais antigos produtos agrícolas. Na atualidade, a soja domina o mercado mundial tanto de proteína vegetal como de óleo comestível. O óleo de soja é ímpar em suas propriedades, sendo indicado para um vasto número de aplicações (MORETTO; FETT, 1998).

O óleo de soja é classificado em três classes, segundo o seu grau de elaboração: bruto ou cru é o óleo tal qual foi extraído do grão; degomado ou purificado é o óleo que após sua extração, teve extraído os fosfolipídios, e refinado é o óleo que após sua extração e degomagem, foi neutralizado, clarificado e desodorizado. Este óleo é bastante utilizado no ramo alimentício (óleo de cozinha, tempero de saladas, produção de margarinas, gordura vegetal, maionese, outros) (DA FRÉ, 2009).

2.3.3 ÁCIDOS GRAXOS

Os ácidos graxos que fazem parte dos lipídios ou gorduras são pertencentes a dois grupos: dos ácidos graxos não saturados e ácidos graxos saturados (FRANCO, 2012). Os ácidos graxos ocorrem apenas em traços na forma livre (não esterificada). A maior parte dos ácidos graxos naturais encontra-se esterificada com o glicerol (1,2,3- triidroxipropano), formando

triacilgliceróis. As unidades acila, correspondentes aos ácidos graxos, representam aproximadamente 95% do peso molecular dos triacilgliceróis. As propriedades químicas, físicas e nutricionais dos óleos e gorduras dependem, fundamentalmente, da natureza, do número de átomos de carbono e da posição dos grupos acila presentes nas moléculas dos triacilgliceróis (DA FRÉ, 2009).

Os ácidos graxos se diferenciam basicamente um do outro pelo comprimento da cadeia hidrocarbonada e pelo número e posição das duplas ligações. As ligações duplas dos ácidos insaturados estão localizadas na cadeia de forma não conjugada (sistema 1,4- diênico), frequentemente separadas por grupo metilênico (α -CH₂). As duas unidades da molécula encontram-se frequentemente num dos lados da ligação dupla, assumindo configuração espacial do tipo *cis* = Z. Entretanto, a configuração *cis* pode ser convertida no isômero *trans* = E no processo de rancidez autoxidativa, em reações de hidrogenação catalítica na presença de níquel e nos aquecimentos prolongados em temperaturas elevadas (MORETTO; FETT, 1998).

As duplas ligações existentes nos ácidos graxos insaturados de ocorrência natural estão na configuração *cis*, predominantemente. Isômeros *cis-trans* possuem propriedades físicas diferentes, têm diferentes pontos de fusão e ebulição e podem apresentar diferentes reatividades. Os teores de ácidos graxos *trans* aparecem em pequenas quantidades nos ácidos graxos dos óleos e gorduras vegetais, em teores relativamente maiores em óleos e gorduras de origem animal e em grandes quantidades em gorduras modificadas pelo processo de hidrogenação. Nos ácidos graxos, caso a configuração seja omitida, admite-se, geralmente, para a dupla ligação, a configuração *cis*. O Quadro 1 apresenta a simbologia e a nomenclatura UIQPA (União Internacional de Química Pura e Aplicada) e usual de diversos ácidos graxos *cis*. A maioria destes ácidos graxos são comumente encontrados em alimentos (VISENTAINER; FRANCO, 2006).

Quadro 1 - Simbologia e nomenclatura sistemática e usual de ácidos graxos

SÍMBOLO	NOMENCLATURA UIQPA	NOMENCLATURA USUAL	SÍMBOLO	NOMENCLATURA UIQPA	NOMENCLATURA USUAL
2:0	Ácido etanóico	Ácido acético	18:1n-11	Ácido 7-octadecenóico	
4:0	Ácido butanóico	Ácido butírico	18:1n-9	Ácido 9-octadecenóico	Ácido oléico
5:0	Ácido pentanóico	Ácido valérico	18:1n-7	Ácido 11-octadecenóico	Ácido cis-vaccênico
6:0	Ácido hexanóico	Ácido capróico	18:1n-6	Ácido 12-octadecenóico	
7:0	Ácido heptanóico	Ácido enântico	18:1n-5	Ácido 13-octadecenóico	
8:0	Ácido octanóico	Ácido caprílico	18:2n-6	Ácido 9,12-octadecadienóico	Ácido linoléico (LA)
9:0	Ácido nonanóico	Ácido pelargônico	18:3n-6	Ácido 6,9,12-octadecatrienóico	Ácido gama-linolênico
10:0	Ácido decanóico	Ácido cáprico	18:3n-3	Ácido 9,12,15-octadecatrienóico	Ácido alfa-linolênico (LNA)
10:1n-1	Ácido 9-decenóico	Ácido caproléico	18:4n-3	Ácido 6,9,12,15-octadecatetraenóico	Ácido estearidônico
11:0	Ácido undecanóico (hendecanóico)	Ácido undecílico	19:0	Ácido nonadecanóico	Ácido nanodécílico
11:1n-1	Ácido 10-undecenóico (10-hendecenóico)	Ácido undecilênico	19:1n-12	Ácido 7-nonadecenóico	
12:0	Ácido dodecanóico	Ácido láurico	20:0	Ácido eicosanóico	Ácido araquídico
12:1n-3	Ácido 9-dodecanóico	Ácido lauroléico	20:1n-9	Ácido 11-eicosenóico	Ácido gondóico
13:0	Ácido tridecanóico	Ácido tridecílico	20:2n-6	Ácido 11,14-eicosadienóico	
14:0	Ácido tetradecanóico	Ácido mirfístico	20:3n-6	Ácido 8,11,14-eicosatrienóico	Ácido di-homo-gama-linolênico
14:1n-9	Ácido 5-tetradecenóico	Ácido fisetérico	20:3n-3	Ácido 11,14,17-eicosatrienóico	Ácido di-homo-alfa-linolênico
14:1n-5	Ácido 9-tetradecenóico	Ácido miristoléico	20:4n-6	Ácido 5,8,11,14-eicosatetraenóico	Ácido araquidônico (AA)
15:0	Ácido pentadecanóico	Ácido pentadécílico	21:0	Ácido heneicosanóico	
15:1n-5	Ácido 10-pentadecenóico		22:0	Ácido docosanóico	Ácido behênico
16:0	Ácido hexadecanóico	Ácido palmítico	22:1n-11	Ácido 11-docosenóico	Ácido cetoléico
16:1n-7	Ácido 9-hexadecenóico	Ácido palmitoléico	22:1n-9	Ácido 13-docosenóico	Ácido erúico
16:2n-6	Ácido 7,10-hexadecadienóico		22:2n-6	Ácido 13,16-docosadienóico	
17:0	Ácido heptadecanóico	Ácido margárico	23:0	Ácido tricosanóico	
17:1n-7	Ácido 10-heptadecenóico		24:0	Ácido tetracosanóico	Ácido lignocérico
18:0	Ácido octadecanóico	Ácido esteárico	24:1n-9	Ácido 15-tetracosenóico	Ácido nervônico
18:1n-12	Ácido 6-octadecenóico	Ácido petroselínico			

Fonte: Adaptado de Da Fré (2009)

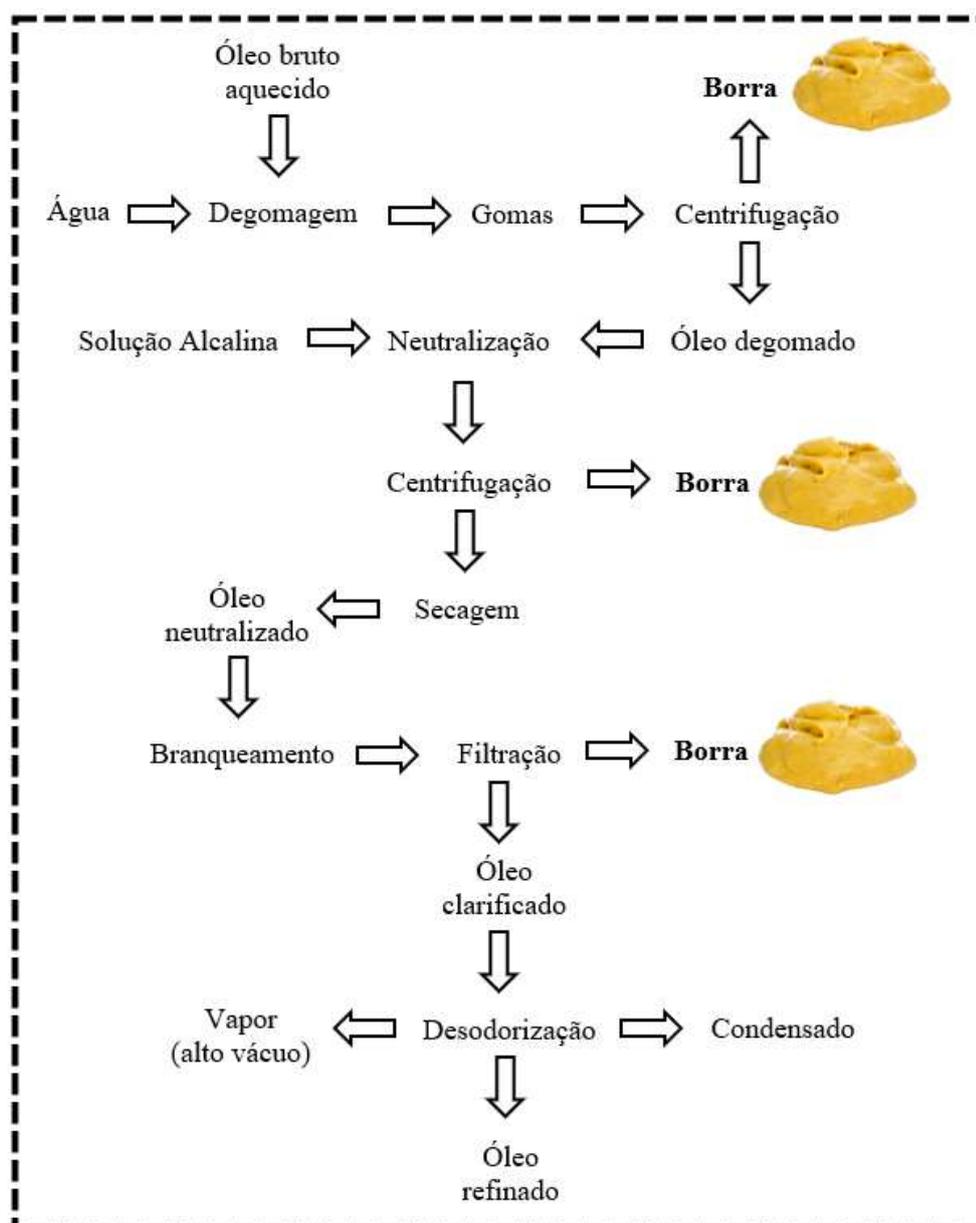
2.3.4 REFINO DO ÓLEO BRUTO DE SOJA

Da Fré (2009) aponta que a industrialização das sementes oleaginosas se divide em duas partes: produção de óleo bruto e refino do óleo bruto produzido. O refino pode ser definido como um conjunto de processos que visam transformar os óleos brutos em óleos comestíveis. Apesar da existência de óleos brutos que são viáveis para consumo, como o azeite de oliva, azeite de dendê e outros, a maioria dos óleos passam pelo processo de refino. Segundo Mandarino, Hirakuri e Roessing (2015), a finalidade do refino é uma melhora da aparência, odor e sabor do óleo bruto, por meio da remoção dos seguintes componentes:

- substâncias coloidais, proteínas, fosfatídeos e produtos de sua decomposição;
- ácidos graxos livres e seus sais, ácidos graxos oxidados, lactonas, acetais e polímeros;
- substâncias coloridas como clorofila, xantofila, carotenoides, incluindo-se neste caso o caroteno ou provitamina A;
- substâncias voláteis como hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos, cetonas e ésteres de baixo peso molecular;
- substâncias inorgânicas como os sais de cálcio e de outros metais, silicatos, fosfatos, dentre outros minerais e;
- umidade.

A Figura 3 apresenta as principais etapas do processo de refino do óleo de soja bruto que são: degomagem (hidratação), neutralização (desacidificação), branqueamento (clarificação) e desodorização.

Figura 3 - Fluxograma do processo de refino dos óleos e gorduras



Fonte: Adaptado de Da Fré (2009)

2.3.5 BORRA DO ÓLEO DE SOJA

A borra do refinamento do óleo de soja é uma emulsão oleosa alcalina constituída por água, ácidos graxos saponificados, fosfatídeos, triglicérides, pigmentos e outros compostos em menor quantidade. No refino do óleo de soja, ela é formada durante a etapa de neutralização

dos ácidos graxos livres com hidróxido de sódio e o volume de borra gerado é, aproximadamente, 6% do volume de óleo bruto (PARK *et al.*, 2008).

A borra é o principal subproduto da indústria de refino de óleos vegetais. Este subproduto consiste basicamente de água, sais de sódio de ácidos graxos, triglicerídeos, fosfolipídios, matéria insaponificável e produtos de degradação (MAG *et al.*, 1983; WOERFEL, 1995). De acordo com a classificação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Norma Brasileira (NBR) 10004 (ABNT, 2004), a borra do óleo de soja é considerada um resíduo de Classe I. Resíduos pertencentes a essa classe, devido as 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.

Os ácidos graxos de soja ou óleo ácido obtidos a partir da acidulação da borra são matérias-primas procuradas como fonte de ácidos graxos de custo menos elevado. Esse produto pode ser utilizado como componente para rações de frango de corte, devido às suas propriedades nutricionais (GAIOTTO *et al.*, 2000; FERNANDES *et al.*, 2002), como coletor de apatita, no tratamento de minérios, devido à sua capacidade de alterar as superfícies minerais (OLIVEIRA, 2005) e como matéria-prima, para a produção de biodiesel, em substituição aos óleos vegetais comestíveis (CANAKCI; SANLI, 2008; PARK *et al.*, 2008).

No Brasil, estes são comercializados sob a forma de óleo ácido de soja, após a reação de acidulação para a liberação dos ácidos graxos e separação da água contida. Este óleo ácido é matéria-prima que apresenta fonte de ácidos graxos de custo menos elevado. A borra bruta contém normalmente entre 35 – 50% de ácidos graxos totais e a forma concentrada definida como borra acidulada normalmente apresenta 85-95% (SWERN, 1982).

Os ácidos graxos resultantes da acidulação da borra também 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. Além disso, os ácidos graxos destilados possuem inúmeras aplicações no mercado alimentício, tintas e

vernizes, fertilizantes, agroquímicos, plásticos, borrachas, resinas, surfactantes, ésteres, lubrificantes, cosméticos, biocombustíveis, entre outros. Variadas vantagens caracterizam os ácidos graxos destilados como valiosa matéria-prima básica, sendo biodegradáveis, renováveis, além de sua disponibilidade e origem vegetal (ARAÚJO *et al.*, 2016).

Segundo Da Fré (2009) a borra pode ser usada para fabricação de sabão em pó ou em barra e, para reduzir o custo de seu transporte, a matéria graxa pode ser recuperada por acidificação com ácido sulfúrico em reatores de aço inoxidável, resistentes à ação do ácido. Depois da separação da fase aquosa, a borra acidulada (ácido graxo da borra) contém usualmente mais de 60% de ácidos graxos livres, sendo o restante glicerídeos e substâncias não graxas (MANDARINO; HIRAKURI; ROESSING, 2015). Existem instalações industriais de acidulação de borra nas quais é adicionado ácido sulfúrico, seguido de aquecimento e separação contínua da matéria graxa da fase aquosa por centrifugação. A separação das fases após processo de acidulação pode também ser realizada por decantação, sendo essa separação denominada descontínua (MORETTO; FETT, 1998).

2.4 USO DE RESÍDUOS NA INDÚSTRIA DA PAVIMENTAÇÃO E A ECONOMIA CIRCULAR

A economia do país é fortemente influenciada pela indústria da construção civil, até mesmo na etapa pós-obra (OLIVEIRA, 2021). Guggnberger e Rotondaro (2021) apontam que este setor propicia uma grande parcela de empregos no país e representa 7% do Produto Interno Bruto (PIB). A elevada produção da indústria da construção provoca impactos ambientais, principalmente, o consumo de recursos naturais (JOHN, 2010).

Harvey *et al.* (2010) apontam que o ciclo de vida de um pavimento inclui produção de material, construção, uso, manutenção e reabilitação (M&R) e fase de fim de vida (FFV). O tradicional modo de produção de materiais envolve a economia linear, que adota uma perspectiva de tirar-fazer-descartar, onde a matéria-prima é extraída, o pavimento asfáltico é produzido e os resíduos gerados ao fim da vida útil são descartados, poluindo os corpos d'água e o solo (AJWANI-RAMCHANDANI *et al.*, 2021). Em uma economia linear, os recursos naturais tornam-se materiais básicos e produtos para venda por meio de uma série de etapas de agregação de valor, não considerando a possibilidade da reintrodução dos materiais na economia nem o fluxo que envolve as diversas etapas produtivas (STAHEL, 2016).

Um conceito que tem ganhado visibilidade por governos, instituições, empresas e pesquisadores, é a Economia Circular (EC). Essa concepção está sendo promovida pela União Europeia e por vários governos individualmente, incluindo Japão, Reino Unido, China, França, Canadá, Suécia, Holanda e Finlândia (KORHONEN *et al.*, 2018; EUROPEAN COMMISSION, 2019). A compreensão contemporânea da EC incorporou conceitos e abordagens consolidados, como berço ao berço (MCDONOUGH; BRAUNGART, 2010), economia em loop (STAHEL; REDAY, 1976), ecologia industrial (GRAEDEL; ALLENBY, 2010) e biomimética (BENYUS, 1997). As ECs são vistas como sistemas regenerativos nos quais recursos, insumos, emissão de resíduos e vazamento de energia são minimizados pela desaceleração, fechamento e estreitamento dos ciclos de materiais e energia (LYLE, 1996). Isso pode ser alcançado por meio de projeto duradouro, manutenção, reparo, reutilização, remanufatura, reforma e reciclagem, entre outras. Assim, em uma EC, os produtos e materiais são utilizados em seu máximo valor e funcionalidade (GEISENDORF; PIETRULLA, 2019). Além disso, em uma estrutura de EC, o reprocessamento de bens e materiais (MCLAREN *et al.*, 2020) gera empregos e economiza energia, reduzindo o consumo de recursos e o desperdício.

A economia circular é capaz de fornecer modelos alternativos de fluxo de materiais e energia, dentro do sistema econômico; modelos de fluxo que são circulares e optam por minimizar a produção de resíduos e maximizar a vida útil de cada material, serviço ou produto dentro de um sistema (FROSCHE; GALLOPOULOS, 1989; ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013; LINDER *et al.*, 2017). A crescente demanda por matérias-primas, a dependência de outros países, o aumento da população e da demanda por energia, e o impacto no planeta, constituem os fatores mais importantes que levam à crença de que mudar para tal abordagem econômica pode trazer grandes vantagens. Estas vantagens não se limitam apenas aos ganhos ambientais, mas a adoção da EC também parece ser capaz de gerar benefícios econômicos (FRONDERMANN, 2018). De acordo com Su *et al.* (2013) e Geng *et al.* (2012), a implementação da EC pode levar a maior competitividade das empresas, uso mais eficiente de materiais e energia, maior vantagem competitiva, receitas com a comercialização de “resíduos” e redução de penalidades ambientais. Park *et al.* (2010) e Preston *et al.* (2012) apontam que a implantação da EC pode levar a relacionamentos mais diretos com os consumidores por meio do consumo colaborativo, ao mesmo tempo em que reduz os custos com o uso de materiais reciclados, a utilização de planos centralizados de gestão de resíduos e a revenda de produtos usados, projetando um quadro empresarial positivo.

Há necessidade de aprimorar as rotinas de planejamento e gestão econômica para obtenção de alternativas economicamente sustentáveis para as empresas responsáveis pela produção desses materiais, uma vez que seu consumo tem passado por crescentes aumentos. As recentes estratégias de diminuição do consumo energético, como a utilização de equipamentos com menor consumo de energia, a existência de melhores opções de isolamento térmico, entre outras, são incentivadas a fim de que a fase de uso tenha seu impacto diminuído com o tempo, fazendo com que outras etapas ganhem mais relevância, como por exemplo, a produção de materiais. Assim, é necessário conhecer a cadeia produtiva dos materiais de construção e os impactos associados, para uma seleção de materiais mais consciente e sustentável (OLIVEIRA, 2021).

2.4.1 ECONOMIA CIRCULAR E MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

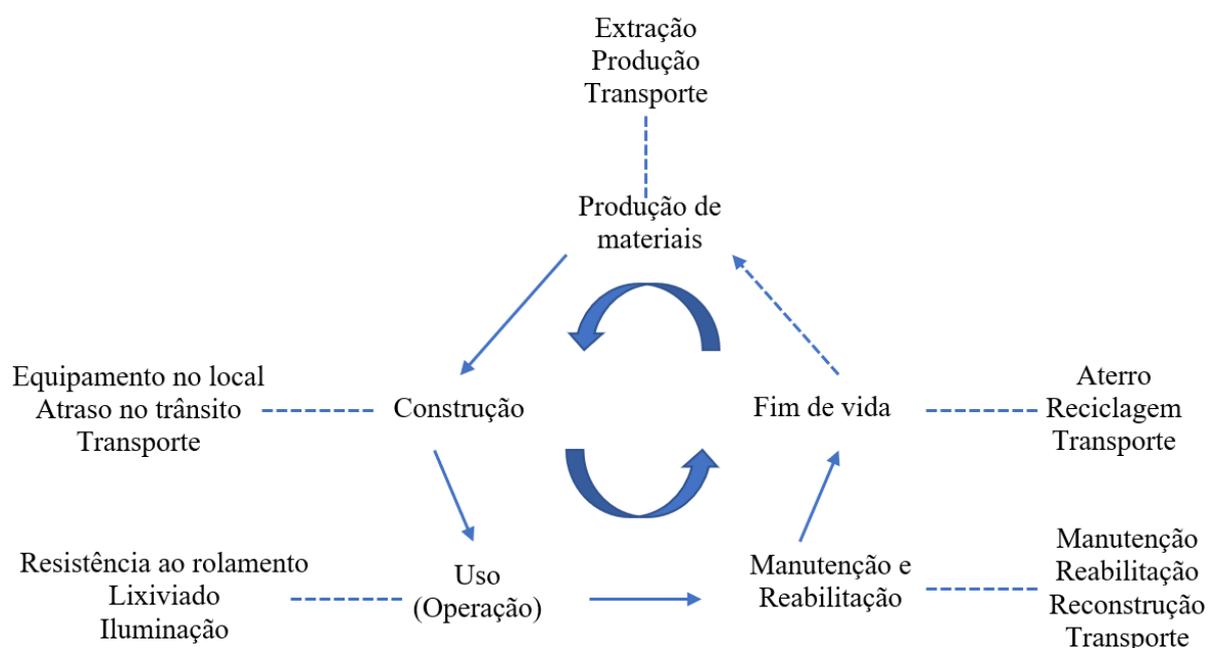
Atualmente, um dos principais desafios da construção de pavimentação de rodovias é minimizar a demanda por recursos naturais e custos de implantação e manutenção (SANTERO *et al.*, 2011a, SANTERO *et al.*, 2011b). Dessa forma, a crescente conscientização sobre pavimentação sustentável tem suscitado a tendência de reciclagem ou reaproveitamento de resíduos sólidos no pavimento de rodovias.

O esforço da indústria da pavimentação em direção a produtos mais circulares ainda vem sendo avaliado em termos de seus impactos ambientais. As iniciativas relacionadas à Economia Circular (EC) devem ser examinadas caso a caso; e no contexto de misturas asfálticas, uma abordagem composta que possa identificar e avaliar os impactos do aumento da circularidade das misturas asfálticas no meio ambiente deve ser adotada. O Índice de Circularidade (ICM) é capaz de fornecer um rótulo de produto final que caracteriza o próprio produto. A implementação desta metodologia para misturas asfálticas recicladas pode levar a uma maior conscientização das autoridades rodoviárias nacionais e empresas de pavimentação sobre o nível de circularidade de seus negócios, podendo constituir uma ferramenta para que os tomadores de decisão envolvidos avaliem o grau de sustentabilidade ambiental de suas práticas e escolhas circulares (MANTALOVAS; DI MINO, 2020).

Os resíduos sólidos comumente reaproveitados no pavimento de rodovias podem ser divididos em três categorias principais: subprodutos do pavimento, subprodutos industriais e subprodutos da construção e demolição (HORVATH, 2003). Os subprodutos do pavimento incluem RAP e pavimentos de concreto, e os subprodutos industriais referem-se aos resíduos

gerados em várias atividades industriais, como a siderúrgica e a geração de eletricidade. Os subprodutos da construção e da demolição são denominados Resíduos de Construção Civil (RCC). O ciclo de vida de um pavimento flexível contempla os processos de extração, produção, transporte, construção, operação, manutenção e fim da vida útil do pavimento. Após a fresagem da camada de revestimento asfáltico, os resíduos podem ser reinseridos no processo de produção de novas misturas asfálticas, implementando a abordagem berço ao berço. A Figura 4 apresenta o ciclo de vida do pavimento flexível.

Figura 4 - Ciclo de vida genérico do pavimento



Fonte: Adaptado de Santero *et al.* (2011a) e Santero *et al.* (2011b)

Dentro de uma abordagem circular se analisa o ciclo de berço ao berço e a análise das etapas de tratamento e disposição final dos resíduos gerados ganham uma maior importância. A reciclagem de revestimento asfáltico é dada pela adição de RAP à nova mistura asfáltica, com o RAP, agregados e ligante asfáltico virgem apresentando o mesmo desempenho de seu emprego original. Essa técnica é composta de reciclagem no local e reciclagem na fábrica, ambas podendo ser subdivididas em reciclagem a quente e reciclagem a frio de acordo com a temperatura da construção durante a reciclagem. Geralmente, a reciclagem a frio no local, a reciclagem a quente no local e a reciclagem a quente na fábrica são empregadas mais comumente. Por outro lado, a reutilização do revestimento asfáltico refere-se à utilização de

RAP como agregados não ligados na camada de base e sub-base, com o RAP e agregados apresentando desempenhos mais pobres do que sua aplicação original (COWELL *et al.*, 2005; ANTHONISSEN *et al.*, 2016). Portanto, o reaproveitamento do RAP pode ser visto como *down-cycling*, um processo de reciclagem de resíduos sólidos que resulta em novos produtos com funcionalidade reduzida e qualidade inferior (HARVEY *et al.*, 2010).

Um ponto considerado na reciclagem de pavimentos asfálticos é a distância de transporte de materiais reciclados e virgens. A distância de entrega excessiva de materiais secundários pode ser prejudicial com o consumo de combustível e as emissões de gases residuais cada vez maiores. Em geral, o cenário mais ideal para resíduos sólidos é a reciclagem local ou próxima. A otimização poderia ser possível pela determinação de áreas de serviço para atribuir as fontes produtoras de resíduos sólidos à planta mais próxima, com base nos resultados da análise de sensibilidade de transporte no contexto específico (LI *et al.*, 2019).

Rodríguez-Fernández *et al.* (2020) desenvolveram uma pesquisa que avaliou a viabilidade mecânica, econômica e ambiental de pavimentos asfálticos porosos. Testes mecânicos, avaliação do ciclo de vida e análise do custo de vida foram realizados para obtenção dos resultados. Os resultados apontaram comportamento mecânico das misturas recicladas semelhante aos da mistura asfáltica convencional, possibilitando redução de mais de 12% e 15% nos impactos ambientais e econômicos da rodovia. Mais pesquisas são necessárias para desenvolver uma melhor compreensão desses impactos, de modo que decisões mais informadas possam ser tomadas pelas organizações governamentais (SALEHI *et al.*, 2021).

Gomes e Malheiros (2012) apontam a importância da utilização de indicadores apropriados ao compor instrumentos para a avaliação ambiental integrada. Os critérios para avaliação dos pontos fortes e fracos dos indicadores e procedimentos para sua aplicação devem possuir valores de referência, ter sensibilidade às mudanças no ambiente, ser de fácil compreensão, ter validade científica, estar disponível e ser de fácil obtenção. Diversas pesquisas voltadas a indicadores e índices na área ambiental vêm sendo desenvolvidas nas últimas décadas. Costa e Sánchez (2010) desenvolveram o Índice de Não conformidade Ambiental Crítico (INCACR) que avalia o desempenho ambiental em obras de recuperação de rodovias. O índice considera os critérios de gravidade, implementação de ação corretiva e reincidência. A escala do índice aponta como satisfatório (bom desempenho ambiental das obras) cuja pontuação que está abaixo de 2 e desempenho insatisfatório (mau desempenho ambiental das obras) acima de 12. A atribuição dos pesos para cada critério foi baseado na opinião de

profissionais de alto conhecimento da área. Nesta mesma linha de avaliação, Jesus (2015) desenvolveu indicadores a partir da aplicação da Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão Construtivista MCDA-C. A metodologia emprega além dos critérios objetivos e quantitativos no processo de tomada de decisões, fatores subjetivos. A interação e a participação dos decisores ao longo do processo são fundamentais para gerar os modelos de análise. Os conceitos utilizados para a avaliação foram: água; gestão; equipe; jurídico; materiais; meio biótico; fauna; vegetação; segurança viária e socioambiental.

Na temática de abordagem circular, estudos (MANTALOVAS; DI MINO, 2019; MANTALOVAS; DI MINO, 2020) avaliando o Índice de Circularidade de Materiais (ICM) na análise da sustentabilidade de misturas asfálticas vêm sendo amplamente empregados. O ICM é capaz de fornecer um rótulo de produto final que caracteriza o próprio produto final. Este índice é quantificado por meio da metodologia desenvolvida pela Fundação Ellen MacArthur (2013) e adaptado para o contexto de misturas asfálticas por Mantalovas e Di Mino (2019).

Os insumos típicos para misturas asfálticas, ou seja, ligante asfáltico e agregados naturais, são obtidos a partir da extração de recursos não renováveis, e seu manejo requer um Modelo Circular Econômico (MEC), alinhado aos objetivos de desenvolvimento sustentável. O ICM é desenvolvido considerando os ciclos técnicos, nos quais os produtos, misturas asfálticas com RAP são avaliadas considerando a recirculação do RAP no processo de construção de revestimentos asfálticos por meio da reciclagem. Os fluxos de materiais, destinados à reciclagem, são originados da fresagem das camadas de revestimento asfáltico em final de vida útil. O primeiro passo para a produção da mistura asfáltica é o tratamento do RAP, por meio da britagem e peneiramento, na usina de reciclagem. Quando o RAP está prestes a ser introduzido no processo de mistura asfáltica, geralmente é tratado como um agregado (rocha negra) e sua porcentagem de massa total caracteriza tanto o desempenho mecânico quanto a durabilidade do produto final. A mistura asfáltica reciclada consiste em matéria-prima virgem e reciclada e pode-se presumir que o produto final está na transição de ser “linear” para se tornar “circular”.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste capítulo, mostrou-se que o aumento da rigidez nas misturas asfálticas recicladas é inerente às propriedades oxidativas presentes no RAP. O uso de altos teores de RAP, acima de 30%, demanda a incorporação de um ligante asfáltico mais macio ou um agente rejuvenescedor para compensar a rigidez do RAP.

Nos últimos anos, a literatura tem focado em análises de misturas asfálticas recicladas com diferentes agentes rejuvenescedores, entre eles óleos, ácidos e compostos rejuvenescedores. Entretanto, ainda há necessidade de estudos com novos agentes rejuvenescedores, oriundos de resíduos de processos industriais, que atuem como redutores de viscosidade e viabilizem o uso por meio de uma avaliação mecânica, econômica e ambiental.

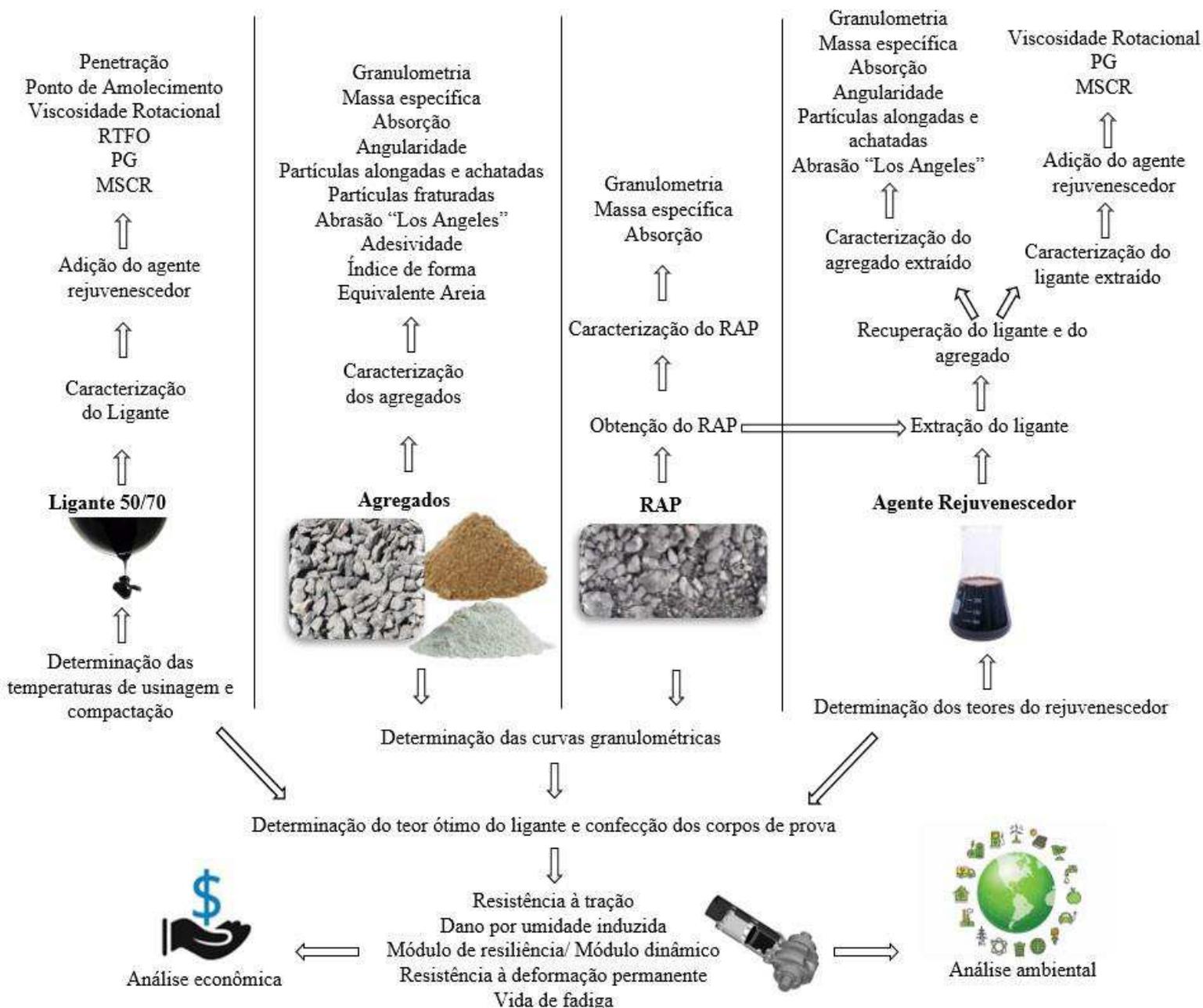
A borra do óleo de soja é um material derivado do processo de refinamento do óleo de soja, de baixo custo e potencial de reciclagem. A investigação desse material como agente rejuvenescedor é necessária. A borra é uma fonte de ácidos graxos, que por meio de um processo de acidulação, fornece o ácido graxo da borra do óleo de soja, um líquido pouco viscoso, de cor escura e com potencial rejuvenescedor mais efetivo por ser um concentrado de ácidos graxos. Portanto, materiais de fontes renováveis e que possuem baixo custo de aquisição deve ser investigados a fim de otimizar o desempenho mecânico da mistura reciclada com alto teor de RAP e que apresente vantagens econômicas e ambientais, viabilizando seu uso.

A partir do que foi apresentado, esse estudo teve o intuito de contribuir com a literatura sobre a análise mecânica de misturas asfálticas recicladas com alto teor de RAP utilizando um agente rejuvenescedor orgânico e oriundo de resíduo industrial. Além disso, foram realizados estudos econômicos e ambientais para medir a efetividade na produção dessas misturas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os materiais utilizados neste estudo para produzir as misturas asfálticas recicladas e o ácido graxo da borra do óleo de soja, bem como os procedimentos realizados para avaliar o desempenho físico-reológico do ligante asfáltico puro e recuperado modificados pelos materiais derivados do processamento do óleo de soja. A Figura 5 apresenta o fluxograma com as etapas de realização deste estudo.

Figura 5 - Fluxograma geral do programa experimental



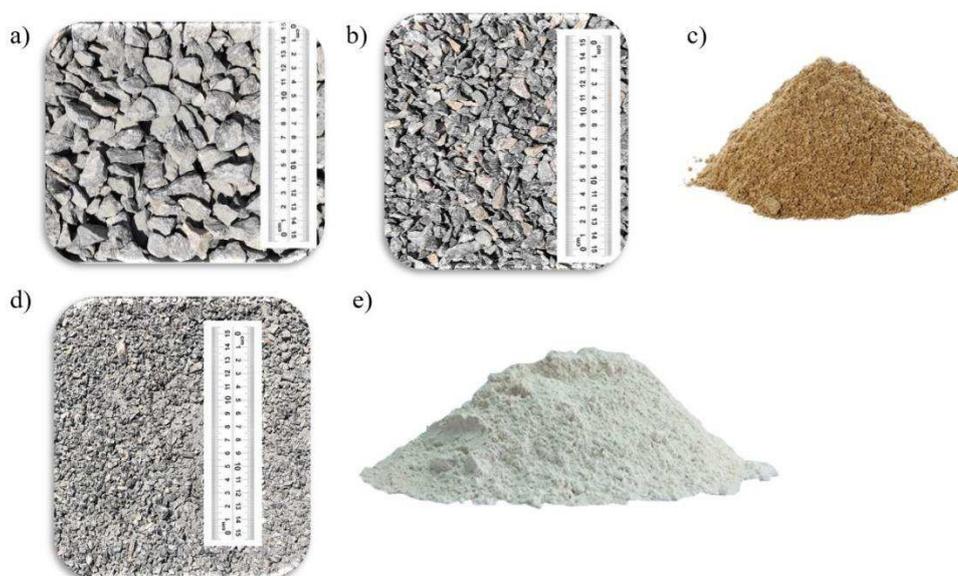
O processo de acidulação da borra do óleo de soja foi realizado no Laboratório de Saneamento da Universidade Federal de Campina Grande e a recuperação do ligante asfáltico foi realizada no Laboratório de Fontes Renováveis de Energia, na mesma universidade. As misturas asfálticas recicladas foram analisadas por meio de ensaios mecânicos e estudo econômico e ambiental na produção destas. Todos os ensaios mecânicos foram executados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP, localizado na Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 AGREGADOS NATURAIS

Os agregados graúdos utilizados para compor as misturas asfálticas recicladas foram as britas graníticas de diâmetro nominal máximo de 19 mm. Os agregados miúdos utilizados nesse estudo foram o pó de pedra, também de natureza granítica, e a areia. A cal hidratada dolomítica foi usada como filer. Os agregados graúdos e o pó de pedra foram cedidos pela empresa Rocha Cavalcante, localizada na cidade de Campina Grande, enquanto a areia o filer foram adquiridos no comércio local do mesmo município. A Figura 6 apresenta os agregados utilizados nessa pesquisa.

Figura 6 - Agregados e filer usados neste estudo: a) Brita 19 mm; b) Brita 12.5 mm; c) Areia; d) Pó de pedra; e) Cal

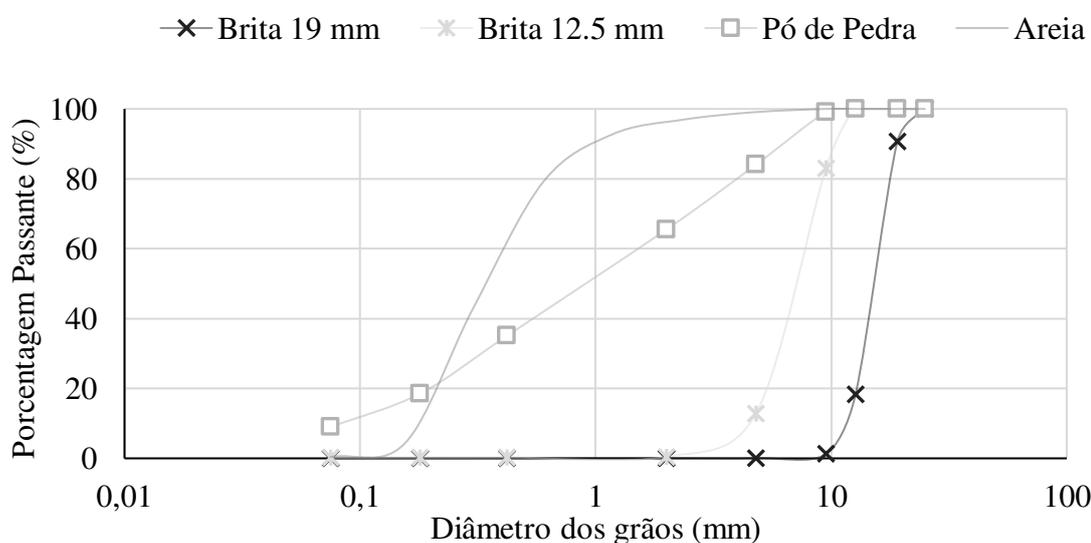


A caracterização dos agregados naturais foi realizada por meio dos procedimentos de massa específica, absorção, índice de forma, equivalente areia, abrasão Los Angeles, análise granulométrica, partículas alongadas e achatadas, adesividade de agregado, partículas fraturadas e angularidade. Na Tabela 1 e Figura 7 são apresentados os resultados desses procedimentos.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados naturais

Ensaio	Norma	Especificação	Resultados			
			Brita 19 mm	Brita 12.5 mm	Pó de pedra	Areia
Massa específica real (g/cm ³)	ASTM C127:2015	-	2.759	2.625	2.542	2.665
Massa específica aparente (g/cm ³)	ASTM C127:2015	-	2.732	2.612	2.430	2.607
Absorção (%)	ASTM C127:2015	≤2	0.36	0.52	0.66	0.835
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 D5821-13:2017	≥90	99.78	99.81	-	-
Angularidade (%)	ASTM C1252:2017	≥45	-	-	45.04	55.35

Figura 7 - Curvas granulométricas dos agregados naturais



Todos os parâmetros analisados se encontraram dentro dos limites apresentados na coluna especificação da Tabela 1. Quanto à distribuição granulométrica dos grãos, os agregados graúdos e a areia apresentam graduação uniforme, enquanto o pó de pedra possui graduação densa.

3.1.2 RAP

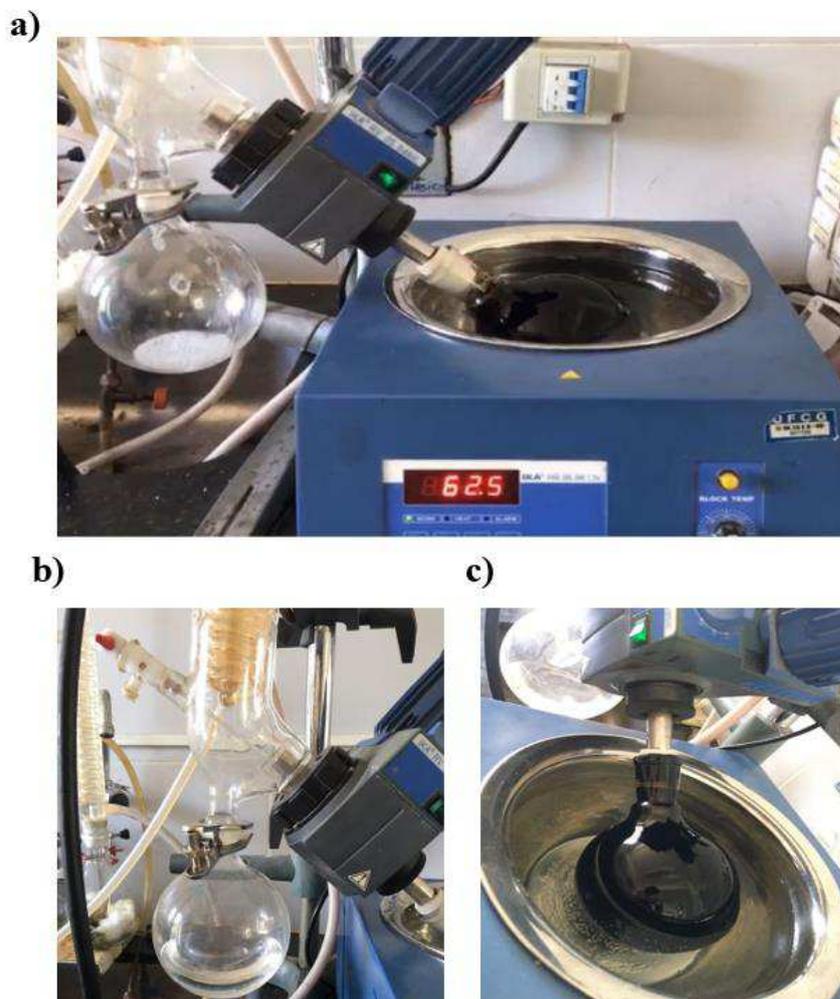
3.1.2.1 LIGANTE ASFÁLTICO RECUPERADO

A extração do ligante asfáltico RAP foi realizada a fim de caracterizá-lo fisicamente e reologicamente para determinação do teor ideal de RAP a ser utilizado na mistura asfáltica reciclada. O ensaio de extração foi realizado com o modelo de centrífuga elétrica, conhecida por Rotarex, e seguindo as recomendações da norma ASTM D2172:2017. O solvente utilizado foi o tricloroetileno (temperatura de ebulição de 87°C), solvente indicado na norma ASTM D2172:2017 e DNIT 158:2011-ME.

A metodologia do ensaio foi realizada conforme as normas supracitadas e a extração do ligante asfáltico baseado no estudo de Gonçalves *et al.* (2019). As amostras ficaram 1 hora em estufa a 110°C. Logo após, as amostras foram destorroadas e pesadas no prato da centrífuga. Posteriormente a pesagem, o material foi coberto totalmente por solvente e, após 15min, a centrífuga foi fechada já com o papel filtro. A centrifugação iniciou-se e, assim que o solvente previamente colocado na amostra tivesse sido totalmente extraído, foi adicionado mais 200ml do diluente, em passos idênticos, até que o solvente saísse límpido, exatamente como preconizado pela norma. Após a realização desse procedimento, o teor de ligante presente no RAP correspondeu a 5.49%.

Em seguida, foi realizada a recuperação do ligante asfáltico oxidado no evaporador rotativo a uma temperatura de aproximadamente 60°C por cerca de 2 horas com vácuo de 0.035 mmHg. A Figura 8 apresenta o rotaevaporador no processo de recuperação.

Figura 8 - Processo de recuperação do ligante asfáltico no rotaevaporador: a) ligante asfáltico com tricloroetileno, b) tricloroetileno retirado do ligante, c) ligante asfáltico recuperado



Após o processo de recuperação do ligante asfáltico oxidado, este foi submetido a uma estufa a vácuo para retirada de possíveis resquícios do tricloroetileno. O ligante recuperado foi submetido à estufa por 6 horas a 70°C e (60 mmHg-700 mmHg), em seguida por mais 2 horas a 85°C e (60 mmHg-700 mmHg) e por fim mais 2 horas a 100°C e (60 mmHg-700 mmHg); esse degrau de temperatura foi necessário pois quanto menos solvente apresentava a amostra mais viscosa ela era, e mais difícil retirar o restante de solvente. O ligante asfáltico recuperado foi caracterizado por meio dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, PG e MSCR. A Tabela 2 apresenta os ensaios de caracterização e os resultados respectivos para o ligante asfáltico recuperado.

Tabela 2 - Caracterização do ligante asfáltico recuperado

Ensaio	Norma	Resultados
Penetração 0.1 mm (100g, 5s a 25°C)	ASTM D5M:2020	29
Ponto de Amolecimento (°C)	ASTM D2872:2019	68
Viscosidade Rotacional (cP)	135 °C	16476
	142 °C	9520
	150°C	6676
	165 °C	2483
	177 °C	1215
Temperatura mais alta do PG (°C)	ASTM D6373:2021	82
Jnr 0.1 (kPa ⁻¹)		1.82
Jnr 3.2 (kPa ⁻¹)		2.30
Jnr diff (%)	ASTM D7405:2020	26.57
R _{0.1} (%)		7.03
R _{3.2} (%)		2.5

O ligante asfáltico apresentou uma temperatura máxima de PG de 82 °C. A elevada rigidez que o RAP apresenta, indica a necessidade do uso do agente rejuvenescedor no ligante asfáltico (AB) para melhorar o desempenho das misturas frente ao trincamento por fadiga. Os elevados valores de viscosidade e o baixo valor de penetração corroboram com a literatura na afirmativa do elevado grau de rigidez que o ligante contido no RAP apresenta.

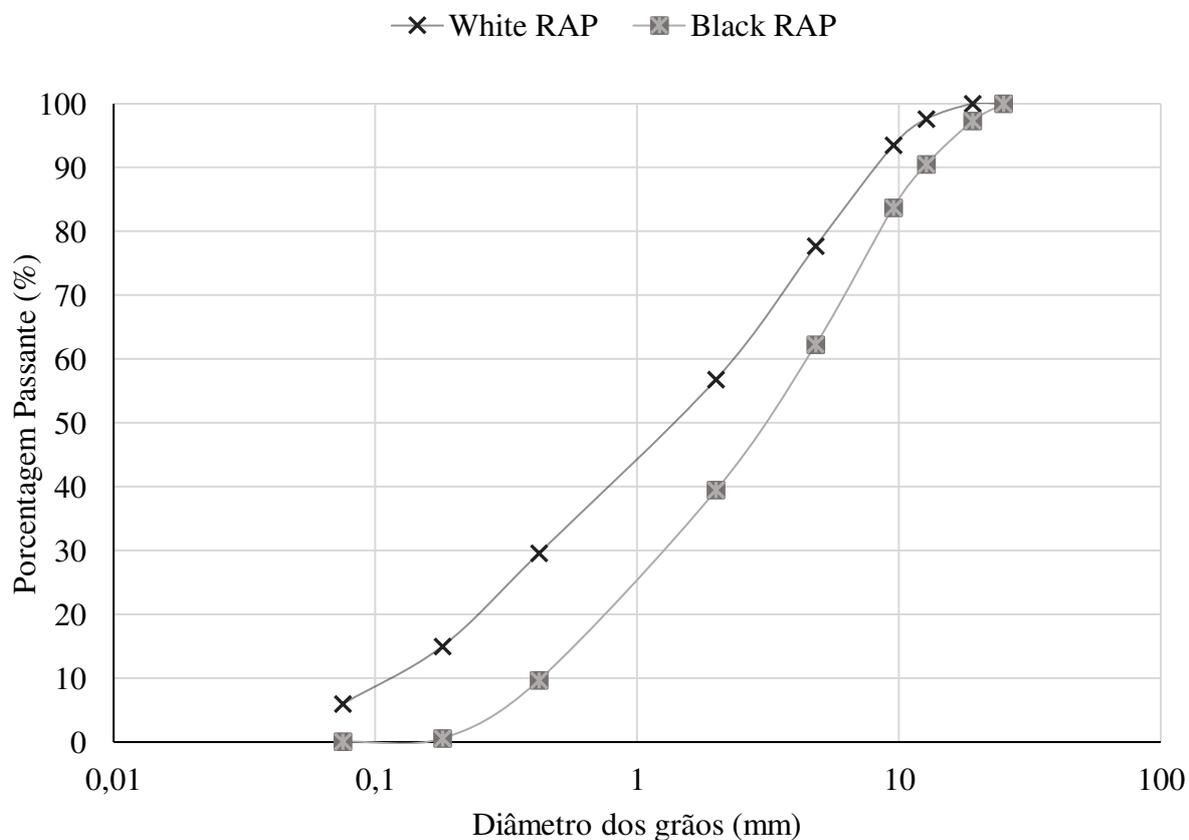
3.1.2.2 AGREGADO RAP

Os ensaios de caracterização realizados com os agregados naturais também foram empregados para o White RAP (RAP sem o ligante asfáltico envelhecido aderido aos agregados) e Black RAP (RAP com o ligante envelhecido aderido aos agregados). A Tabela 3 e a Figura 9 apresentam os resultados da caracterização dos agregados RAP utilizados nessa pesquisa.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados RAP

Ensaio	Norma	Especificação	Resultados	
			Black RAP	White RAP
Massa específica real (g/cm ³)	ASTM C127:2015	-	2.464	2.466
Massa específica aparente (g/cm ³)	ASTM C127:2015	-	2.374	2.378
Absorção (%)	ASTM C127:2015	≤2	0.5	0.89
Equivalente Areia (%)	ASTM D2419:2014	≥55	86.59	68.56
Partículas alongadas e achatadas (%)	ASTM D4791:2019	≤10	-	9.34
Angularidade (%)	ASTM C1252:2017	≥45	52.62	45.43

Figura 9 - Curvas granulométricas dos agregados RAP

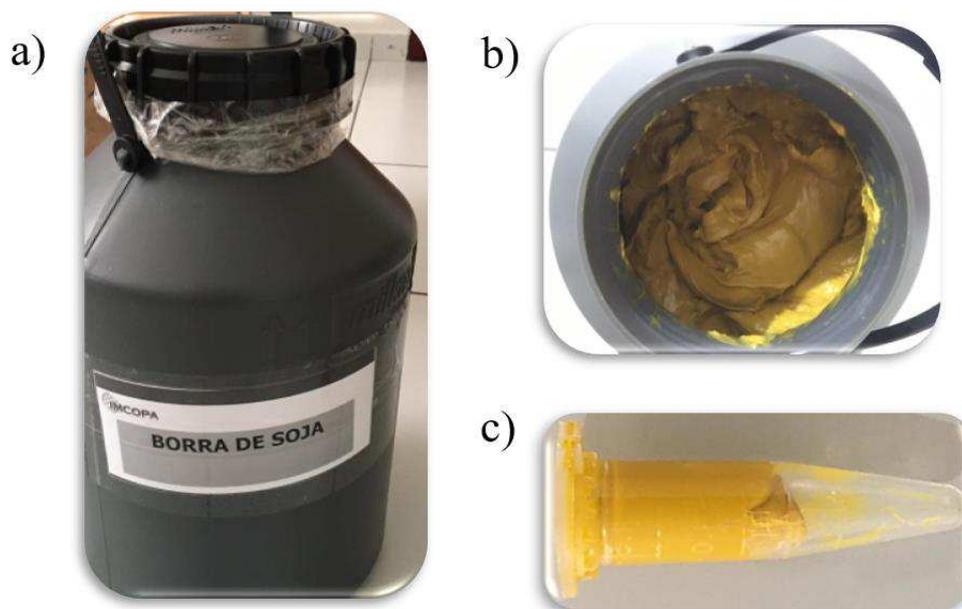


Todos os parâmetros analisados se encontraram dentro dos limites apresentados na coluna especificação da Tabela 3. Quanto à distribuição granulométrica dos grãos, os agregados RAP apresentam graduação uniforme.

3.1.3 BORRA DO ÓLEO DE SOJA

O agente rejuvenescedor utilizado nessa pesquisa foi um material derivado do processamento do óleo de soja, a borra do óleo de soja. A borra do óleo de soja foi obtida pela empresa IMCOPA, localizada no estado do Paraná, Brasil. A Figura 10 apresenta a borra do óleo de soja utilizada nesse estudo.

Figura 10 - Borra do óleo de soja: a) Reservatório para conservação da borra; b) Borra dentro do recipiente; c) Amostra da borra do óleo de soja para análise em laboratório



A indústria disponibilizou a borra sem dados característicos do material, então procedimentos e ensaios laboratoriais foram realizados a fim de caracterizar o material. Para isto, foram realizados ensaios conforme as normas da American Oil Chemists' Society (AOCS) e procedimentos baseados em estudos realizados por Da Fré (2009). Os ensaios foram todos realizados segundo a padronização das normas e adaptados com testes desenvolvidos no estudo de Araújo (2016). Em cada ensaio realizado utilizou-se amostras em triplicata a fim de que os

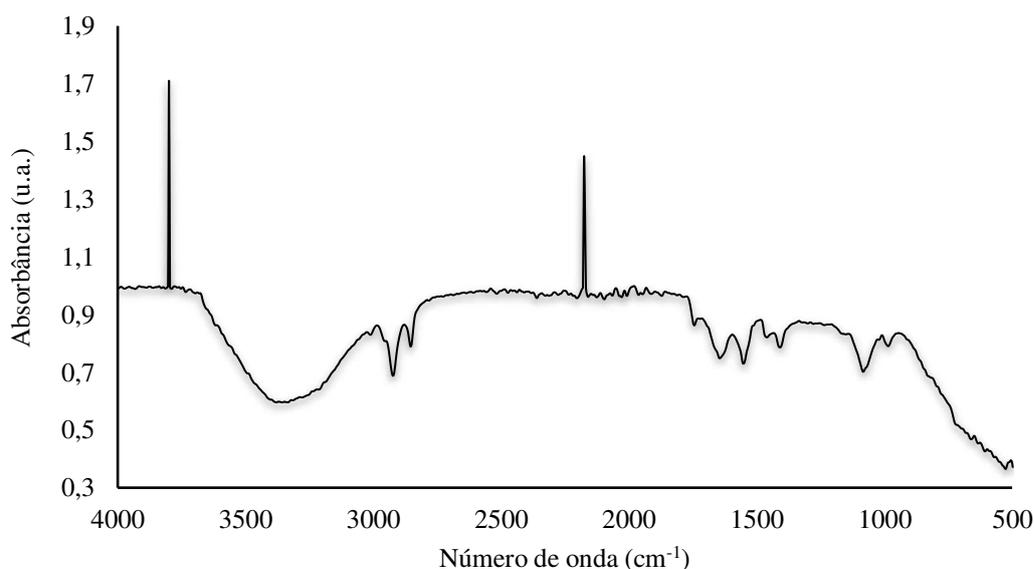
resultados adquiridos pudessem ser mais representativos, sendo o resultado a média das 3 amostras. A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios realizados para caracterizar a borra do óleo de soja.

Tabela 4 – Resultados da caracterização da borra do óleo de soja

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

Swern (1982) aponta que o teor de ácidos graxos totais na borra bruta ocorre dentro da faixa de 35 a 50%, o que corrobora com o resultado obtido neste estudo (41.59%). O teor de umidade determinado foi alto, o que pode vir a influenciar os resultados do ligante asfáltico após o processo de modificação, tendo em vista que mais de 40% da amostra de borra do óleo de soja a ser adicionada ao ligante corresponde à umidade. O teste do pH permitiu verificar o grau de alcalinidade do material, que nesse caso apresentou-se básico ou alcalino por possuir valor acima de 7. A Figura 11 apresenta o espectro referente ao resultado do FTIR para a borra do óleo de soja.

Figura 11 - FTIR da borra do óleo de soja

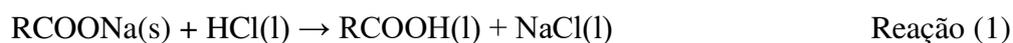


O teste do FTIR (ASTM D 7653:2018) foi realizado a fim de caracterizar quimicamente a amostra por meio da identificação dos grupos funcionais presentes. O espectro obtido apresenta modos e combinações vibracionais de grupos funcionais dos ácidos graxos presentes na composição química da borra do óleo de soja, expondo bandas de absorção na região de 3.010 a 2.800 cm^{-1} , correspondentes às vibrações de deformação axial de ligações C-H de grupamentos metila (CH_3), metileno (CH_2) e das ligações duplas ($=\text{C-H}$). As bandas com intensidade intermediária presentes na região de 1.743 a 1.404 cm^{-1} correspondem a vibração de deformação axial do grupo carbonila (C=O) presente nos grupos ésteres constituintes dos triacilglicerídeos. A presença de bandas de forte absorção na região de 1.080 a 987 cm^{-1} , são atribuídas às vibrações de deformação axial da ligação C-O de ésteres constituintes dos triacilglicerídeos. Assim, devido à presença dessas bandas que não estão presentes no ligante asfáltico AB, pode-se inferir que o material atue como um antioxidante.

Os valores e informações coletados durante os procedimentos experimentais visaram à quantificação e avaliação da qualidade da borra do óleo de soja, que é função direta do teor de ácidos graxos livres presentes no óleo bruto de soja e do modo de operação do seu processo de refino (ARAÚJO, 2016).

3.1.3.1 ACIDULAÇÃO DA BORRA DO ÓLEO DE SOJA

O processo de acidulação foi realizado seguindo procedimentos apresentados na pesquisa de Araújo *et al.* (2016). Em um béquer de 2 litros adicionou-se 200 gramas de borra, 48 mL de HCl, 245 mL de H_2O e 4 gotas de alaranjado de metila (indicador de pH frequentemente usado em titulações). O procedimento indicado pelos autores aponta o uso do ácido sulfúrico, entretanto devido à ausência desse material no laboratório onde a pesquisa foi realizada, optou-se por utilizar o ácido clorídrico, sob condições controladas. A reação foi mantida por 3h30min, sob aquecimento de 90 a 110°C em um agitador magnético com aquecimento Fisatom 752A para conversão dos sabões em ácidos graxos, conforme apresentada a reação (1).



O componente óleo é separado da fase água por decantação, pela gravidade, em um processo batelada. Após decantação, observaram-se três fases: água ácida (camada inferior), emulsão oleosa (camada intermediária) e ácido graxo (camada superior). A fase água, que contém ácido clorídrico livre, sulfato de sódio e impurezas solúveis em água, é então descartada

e a fase óleo obtida é lavada com 25 – 50% de água saturada com cloreto de sódio, aquecida e decantada novamente. Após o descarte da água de lavagem, é obtido o ácido graxo da borra do óleo de soja. Esse processo inicial foi realizado a fim de verificar a efetividade do processo e, a partir disso, o processo foi repetido seis vezes utilizando a mesma proporção a fim de obter o quantitativo necessário para o uso na pesquisa. A Figura 12 apresenta o fluxograma das etapas do processo de acidulação da borra do óleo de soja.

Figura 12 - Fluxograma das etapas do processo de acidulação da borra do óleo de soja

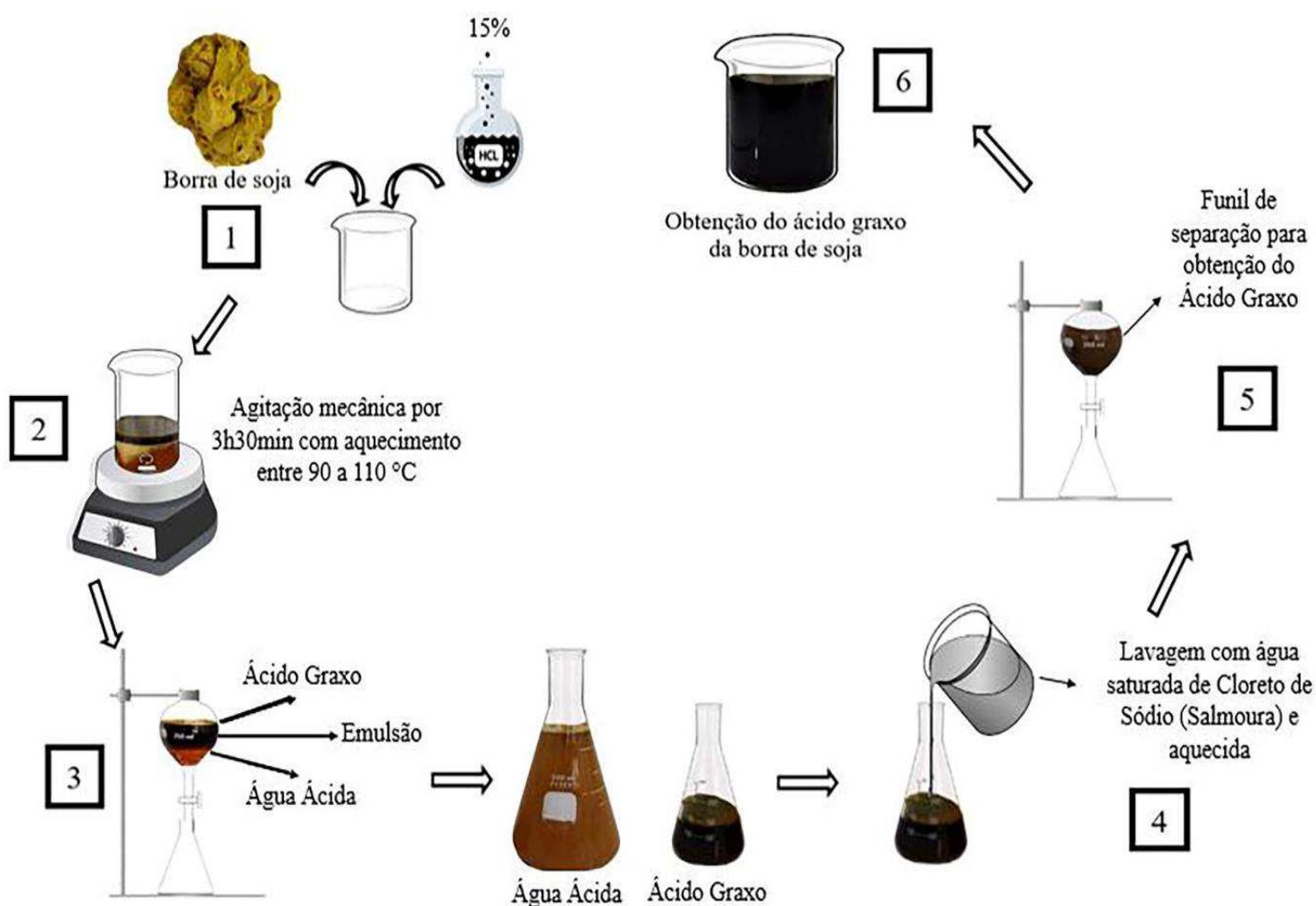
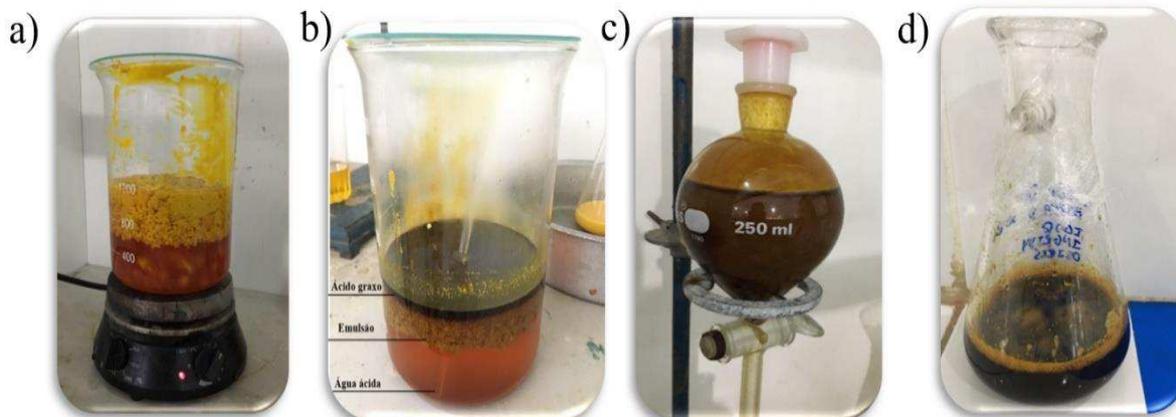


Figura 13 - Processo de acidulação: a) Borra do óleo de soja com ácido clorídrico em aquecimento e agitação; b) Fases após processo de acidulação; c) Funil de decantação para extração do ácido graxo; d) Obtenção do ácido graxo da borra do óleo de soja



Após obtenção do ácido graxo, foi realizado ensaios de caracterização do ácido graxo da borra do óleo de soja. O ácido graxo da borra do óleo de soja obtido apresentou um teor de umidade de 2.26% e um teor de ácidos graxos totais de 91%. Os valores obtidos também corroboram com Swern (1982) que aponta um teor de ácidos graxos totais de 85 a 95% no ácido graxo da borra, devido à elevada concentração de ácidos graxos. Em relação à borra do óleo de soja, o ácido graxo tende a atuar de forma mais eficaz como agente rejuvenescedor devido a quase 100% de sua composição corresponder a ácidos graxos, enquanto a borra apresentou apenas 41.59% de ácidos graxos totais e 41.85% de umidade.

3.1.4 LIGANTE ASFÁLTICO

O ligante asfáltico classificado com penetração 50/70 (AB) foi utilizado para compor as misturas asfálticas recicladas. Este foi cedido pela empresa Cordilheira, localizada na cidade de Campina Grande. A escolha deste tipo de ligante foi estabelecida pelo fato deste possuir corriqueira utilização na Região Nordeste do Brasil.

A Tabela 5 apresenta os resultados da caracterização do ligante asfáltico. Todos os ensaios realizados para o ligante asfáltico puro (AB) foram executados com as amostras de ligante asfáltico modificadas pela a borra do óleo de soja e o ácido graxo da borra do óleo de soja. Os ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional e *performance*

grade (PG) foram realizados com amostras do ligante asfáltico virgem e envelhecidas pelo procedimento de envelhecimento a curto prazo com a estufa de filme fino rotativa (*Rolling Thin Oven Test*). Os ensaios de viscosidade rotacional foram realizados utilizando um viscosímetro rotacional tipo *Brookfield* e os ensaios de reologia em um reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) da série *Discovery Hybrid Rheometer* (DHR-1).

Tabela 5 – Caracterização do ligante asfáltico puro

		Resultados	Normas
		AB	
Penetração 0.1 mm (100g, 5s a 25°C)		58	ASTM D5/D5M: 2020
Ponto de Amolecimento (°C)		52	ASTM D36/D36M – 14: 2020
Viscosidade Rotacional (cP)	135 °C	401	ASTM D4402/D4402M: 2015
	150°C	198	
	177 °C	72.75	
Temperatura máxima de PG (°C)		64	ASTM D6373: 2021
		RTFO	ASTM D2872: 2019
Viscosidade Rotacional (cP)	135 °C	557.50	ASTM D4402/D4402M: 2015
	150°C	269	
	177 °C	94	
Temperatura máxima de PG (°C)		64	ASTM D6373: 2021
MSCR	Jnr a 0.1 kPa	3.4	ASTM D7405:2020
	Jnr a 3.2 kPa	3.83	
	Percentual de recuperação a 0.1 kPa	5.03	
	Percentual de recuperação a 3.2 kPa	0.37	

A modificação dos ligantes asfálticos foi realizada a fim de investigar o comportamento físico-reológico do AB em teores distintos, sendo eles 1, 3 e 5% de borra do óleo de soja e do ácido graxo da borra do óleo de soja. Os teores utilizados foram determinados por meio do estudo de Seidel e Haddock (2014). No processo de mistura (ligante-modificador), foi utilizado um agitador mecânico FISATOM, modelo 722D. O ligante asfáltico foi pré-aquecido em estufa a 135°C por aproximadamente 90 minutos para garantir a fluidez necessária para permitir a homogeneização. Em seguida, o material foi depositado em um béquer e colocado sobre o agitador mecânico, sendo submetido a uma rotação de 600 rpm para garantir homogeneidade na distribuição da mistura. Ao atingir a temperatura de estabilização (140°C), os aditivos foram adicionados, separadamente, na proporção por peso do ligante puro, e as rotações foram elevadas para 1.000 rpm, mantendo as amostras por 30 minutos para homogeneização da

mistura, em teores de 1, 3 e 5%. Essa técnica foi baseada em estudos realizados por Souza (2012) e Faxina (2006). O Quadro 2 apresenta a descrição das amostras utilizadas na pesquisa e suas respectivas nomenclaturas.

Quadro 2 - Nomenclatura das amostras utilizadas na pesquisa

Amostras	Nomenclatura
Ligante asfáltico com grau de penetração 50/70	AB
AB + 1% da borra do óleo de soja	1%SS
AB + 3% da borra do óleo de soja	3%SS
AB + 5% da borra do óleo de soja	5%SS
AB + 1% do ácido graxo da borra do óleo de soja	1%SSFA
AB + 3% do ácido graxo da borra do óleo de soja	3%SSFA
AB + 5% do ácido graxo da borra do óleo de soja	5%SSFA

Após a obtenção dos ligantes asfálticos modificados, foi realizada a caracterização física e reológica dos ligantes, antes e após o envelhecimento *Rolling Thin Film Oven* (RTFO) ASTM D2872: 2019, por meio dos testes de Penetração ASTM D5M: 2020, Ponto de Amolecimento ASTM D36M -14: 2020, Viscosidade Rotacional ASTM D4402: 2015, *Performance Grade* (PG) ASTM D6373: 2021 e *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR) ASTM D7405: 2020. O teste t de amostra pareada, procedimento estatístico utilizado para determinar se a diferença média entre dois conjuntos de observações é zero, foi utilizado para avaliar os resultados obtidos para as amostras do ligante asfáltico modificado. Aplicações comuns do teste t da amostra pareada incluem estudos de caso-controle ou desenhos de medidas repetidas.

A partir dos resultados de penetração e de ponto de amolecimento, foi calculado o índice de suscetibilidade térmica (ISC) (Equação 1). Esse parâmetro indica a sensibilidade da consistência dos ligantes asfálticos à variação de temperatura.

$$ISC = \frac{(500)(\log PEN) + (20)(T^{\circ}C) - 1951}{120 - (50)(\log PEN) + (T^{\circ}C)} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

- T°C = Ponto de amolecimento
- PEN = Penetração a 25°C, 100 g, 5 s

Por meio da relação percentual entre os resultados de penetração das amostras envelhecidas e virgens, foi calculada a penetração retida (PEN_{retida}), de acordo com a Equação 2. Esse parâmetro reflete a sensibilidade do material ao envelhecimento.

$$PEN_{retida}(\%) = \frac{PEN_{pósRTFO}}{PEN_{antesRTFO}} \times 100 \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

- $PEN_{pósRTFO}$ = Valor de penetração após o procedimento RTFO
- $PEN_{antesRTFO}$ = Valor de penetração antes do procedimento RTFO

Outro parâmetro que indica a suscetibilidade do ligante asfáltico ao envelhecimento é a variação no ponto de amolecimento, que consiste na subtração entre o ponto de amolecimento da amostra envelhecida e o ponto de amolecimento da amostra virgem. O ensaio de *Performance Grade* foi realizado verificando-se o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ conforme a variação de temperatura, partindo de 46°C, com incrementos de 6°C. O valor do o PG é dado pela temperatura anterior a da falha verificada no ensaio. A partir do resultado desse ensaio com amostras do ligante asfáltico virgem e envelhecidas a curto prazo, pôde-se calcular o índice de envelhecimento (AI), o qual relaciona o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ do ligante asfáltico antes e após o envelhecimento a uma temperatura, conforme a Equação 3.

$$AI = \frac{G^*/\text{sen}\delta_{pósRTFO}}{G^*/\text{sen}\delta_{antesRTFO}} \quad \text{Equação (3)}$$

O ensaio de MSCR foi realizado na temperatura de PG do ligante asfáltico puro para permitir a comparação das amostras de ligante asfáltico virgem e modificado. As amostras usadas são de ligante asfáltico envelhecidas pelo RTFO. Durante o ensaio são aplicados 20 ciclos de tensão ao ligante asfáltico, sendo os 10 primeiros ciclos sob a tensão de 0.1 kPa e os demais sob a tensão de 3.2 kPa.

A partir dos resultados da deformação das amostras devido às tensões, foram calculadas as compliâncias não-recuperáveis (Jnr), a diferença percentual entre as compliâncias não-recuperáveis de 0.1 kPa e 3.2 kPa (Jnr_{diff}) e porcentagem de recuperação elástica (%R).

3.2 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.2.1 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

3.2.1.1 DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA DE REFERÊNCIA

A dosagem da mistura asfáltica a quente foi realizada seguindo a metodologia SUPERPAVE com 100 giros, normatizada pela ASTM D6925: 2015. O nível de tráfego utilizado foi o médio a alto e o tamanho máximo nominal (TMN) foi 19.0mm, tendo em vista os agregados especificados no tópico 3.1.

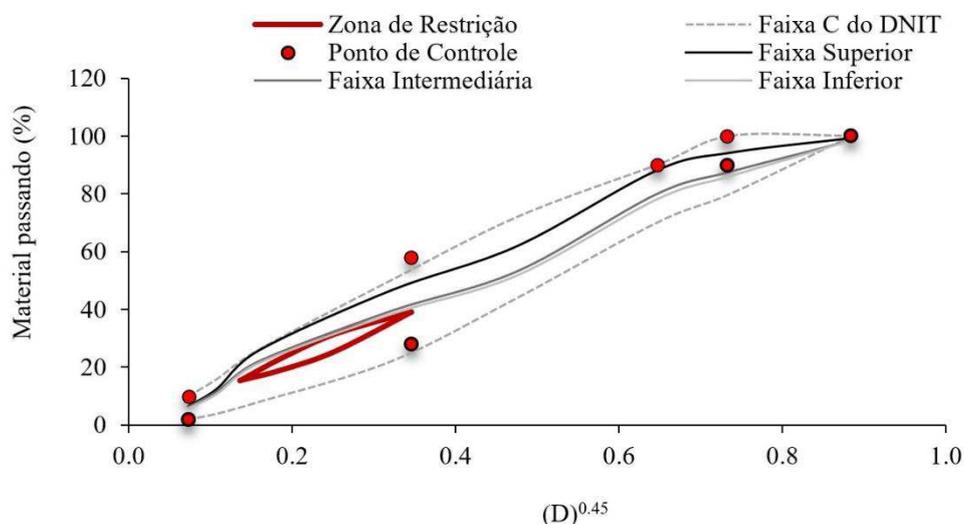
A dosagem da mistura asfáltica de referência foi realizada em três etapas:

- Primeira etapa: consistiu na escolha de três composições granulométricas distintas, que são estabelecidas pela ponderação da granulometria dos agregados em uma granulometria única. A escolha das proporções dos agregados foi feita de forma a adequar a granulometria das misturas aos requisitos da metodologia SUPERPAVE e enquadrá-las aos limites estabelecidos para faixa C do DNIT 031/2006 – ES. As proporções finais dos agregados escolhidos para cada uma das três composições estudadas são apresentadas na Tabela 6. As três granulometrias da mistura dos agregados foram referidas como “curva inferior”, “curva intermediária” e “curva superior”. Estas estão apresentadas graficamente na Figura 14, juntamente com a Faixa C do DNIT para misturas asfálticas.

Tabela 6 - Proporções de agregados para a mistura asfáltica de referência

	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

Figura 14 - Curvas inferior, intermediária e superior, TMN = 19.0 mm



- Segunda etapa: Após obtenção das três composições granulométricas adequadas aos requisitos da metodologia, prosseguiu-se para compactação de corpos de prova (CPs) com teor de ligante inicial estipulado em 5% em peso total da mistura asfáltica, para as três composições estudadas. Os CPs foram compactados no Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS) seguindo a norma ASTM D6925: 2015. Neste estágio, foram moldados dois CPs para cada curva e para cada um dos três esforços de compactação (número de giros) diferentes: $N_{inicial}$, $N_{projeto}$ e $N_{máximo}$. Para o nível de tráfego médio a alto, esses esforços são respectivamente 8 giros, 100 giros e 160 giros. O $N_{projeto}$ foi usado para selecionar o teor de ligante de projeto, enquanto o $N_{inicial}$ e $N_{máximo}$ foram usados para avaliar a compactação da mistura. A Tabela 7 apresenta os parâmetros calculados para as três composições granulométricas avaliadas e apresenta as especificações de acordo com o critério SUPERPAVE.

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

Composição granulométrica	Teor de ligante (%)	%Gmm @ $N_{inicial}$	%Gmm @ $N_{projeto}$	%Gmm @ $N_{máximo}$	VAM (%)	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
Critérios SUPERPAVE		<89%	96%	<98%	≥13	4%

A partir desses resultados foi possível concluir que a composição intermediária atendeu às exigências da dosagem e apresentou o volume de vazios (Vv) próximo de 4%. Dessa forma, escolheu-se trabalhar com essa composição para escolher o teor de ligante asfáltico de projeto.

- Terceira etapa: após determinação da curva a ser utilizada para produção das misturas asfálticas, foi realizado o procedimento de teste dos teores de ligante para definição do teor ótimo de acordo com os critérios SUPERPAVE. Dois corpos de prova para cada teor (4.25%, 4.75%, 5.00%, 5.25% e 5.75%) foram compactados a fim de verificar qual desses teores apresenta parâmetros dentro dos critérios especificados. A Tabela 8 apresenta os parâmetros volumétricos para os teores de ligante testados, incluindo os resultados da relação ligante-vazios (RBV) e a relação pó/ligante asfáltico (P/A). Conforme os dados apresentados, o teor de de projeto escolhido foi de 4.75% de ligante asfáltico para a mistura asfáltica de referência.

Tabela 8 - Resumo dos parâmetros volumétricos da mistura de projeto

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
Critérios SUPERPAVE	96%	≥13.00	4.00	65-75	0.6-1.2

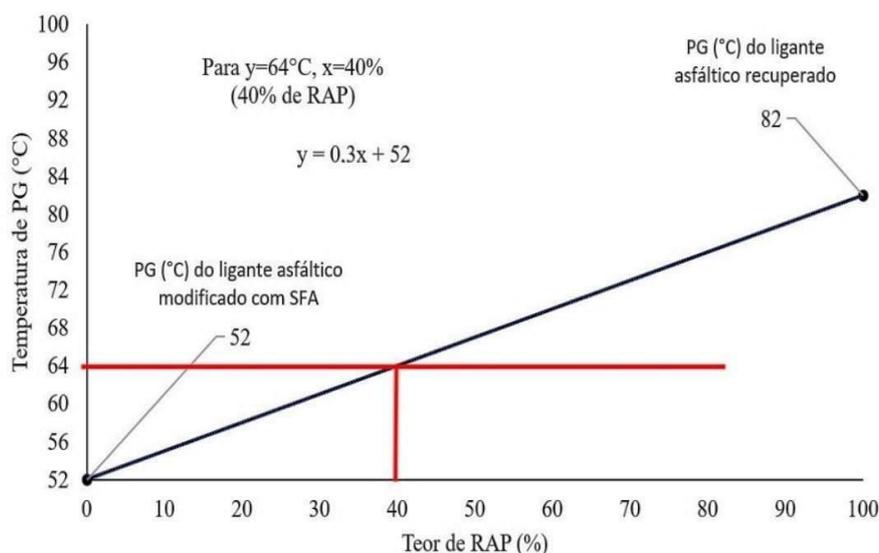
3.2.1.2 DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA RECICLADA

Os dados da caracterização do ligante asfáltico foram utilizados para definir o teor ideal de RAP a ser implementado na dosagem da mistura asfáltica reciclada pelo método *Blending Chart* (método B), ligante asfáltico virgem conhecido e teor de RAP desconhecido, da NCHRP *Report 452:2001*. O tipo de ligante asfáltico a ser utilizado é determinado com base no clima e no nível de tráfego para o projeto específico onde a mistura será usada. Em geral, a agência de especificação determina qual o ligante a ser utilizado nos documentos do contrato.

Quando o RAP é utilizado, no entanto, o ligante asfáltico virgem pode ser modificado para compensar a adição do ligante RAP antigo e endurecido. Em caso de estabelecer qual ligante asfáltico virgem a ser utilizado, é necessário determinar o teor de RAP que pode ser usado com o grau específico de ligante virgem e ainda atender à proposta final de ligante asfáltico misturado. Para isso, após a recuperação do ligante asfáltico, um gráfico de mistura foi produzido para definir o teor de RAP a ser adicionado na mistura asfáltica reciclada.

Na construção do gráfico utilizou-se os dados de PG do ligante asfáltico recuperado (82°C) e o menor valor de PG obtido após análise do ligante modificado com a borra do óleo de soja e o ácido graxo da borra do óleo de soja com a incorporação do ácido graxo, sendo 52°C a temperatura de PG; esses dados serão discutidos no próximo capítulo que aborda os resultados desta pesquisa. A Figura 15 apresenta o gráfico com o teor de RAP utilizado neste estudo.

Figura 15- Definição do teor de RAP a ser adicionado na mistura asfáltica reciclada

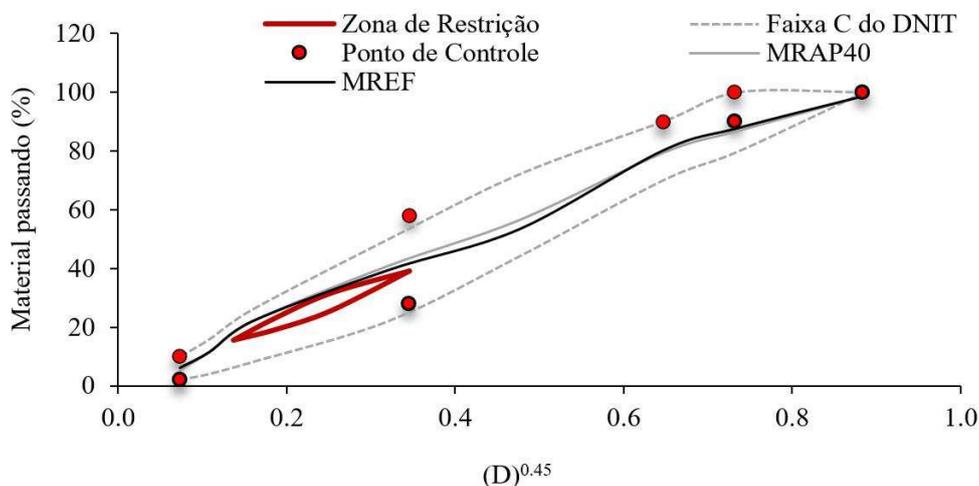


De acordo com o gráfico construído pelo método B da NCHRP *Report 452:2001* na Figura 17, o teor de RAP a ser utilizado na mistura asfáltica para uma temperatura de PG de trabalho de 64°C foi de 40%. A Tabela 9 apresenta as porcentagens dos agregados que se enquadraram na curva intermediária da mistura, tendo em vista que a mistura de referência foi dosada pela curva intermediária. A Figura 16 apresenta a curva da composição da mistura reciclada dentro da faixa C do DNIT.

Tabela 9 - Proporções de agregados da mistura asfáltica reciclada

	Brita 19.0 mm	Brita 12.5 mm	Pó de Pedra	Areia	Cal	RAP
Intermediária (%)	15	18	25	1	1	40

Figura 16 – Faixa granulométrica da mistura asfáltica com 40%RAP, TMN = 19.0 mm



O teor de ligante obtido no RAP foi de 5.49%, e considerou que o ligante presente no RAP atua como “*partial blending*”, ou seja, apenas uma parcela parcial do ligante RAP interage com o ligante asfáltico virgem. Wellner *et al.* (2015) sugerem que se admita uma interação entre 60 e 100% de ativação do ligante RAP para que se tenha bons resultados de desempenho mecânico. A partir dessa hipótese, foram testados os seguintes teores de ligante asfáltico: 2.50; 2.75; 3.00; 3.25; 3.50; 3.75 e 4.0 para determinar o teor de projeto para a mistura asfáltica reciclada na dosagem da mistura. A Tabela 10 apresenta os parâmetros encontrados com o teor de ligante de projeto definido.

Tabela 10 - Parâmetros volumétricos da mistura com o teor de ligante de projeto da mistura asfáltica reciclada

Teor de ligante (%)	%Gmm @Nprojeto	VAM (%)	Vv (%)	RBV (%)	P/A (%)
2.5	91.95	18.29	8.05	77.11	1.23
2.75	93.21	17.58	6.79	76.5	1.3
3.0	94.10	17.17	5.9	76.17	1.34
3.25	95.54	16.33	4.46	75.36	1.47
3.5	96.4	16.24	3.78	75.29	1.41
3.75	96.11	16.48	3.89	75.72	1.38
4.0	97.62	15.72	2.38	75.08	1.5
Critérios SUPERPAVE	96%	≥13	4	65-75	0.6-1.2

A partir dos dados apresentados na Tabela 9, o teor de ligante de projeto determinado para a mistura asfáltica reciclada foi de 3.5%, pois foi o teor que mais se adequou às especificações do critério SUPERPAVE, possibilitando a redução de 1.25% de ligante asfáltico virgem na composição das misturas recicladas.

3.2.2 ENSAIOS MECÂNICOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A análise de comparação das misturas asfálticas recicladas foi realizada por meio de ensaios de resistência à tração, dano por umidade induzida, módulo de resiliência, módulo dinâmico, resistência à deformação permanente e resistência à fadiga. As misturas asfálticas analisadas nesse estudo foram: mistura asfáltica de referência (0%RAP e 0%SSFA) e misturas asfálticas recicladas modificadas com o ácido graxo da borra do óleo de soja nos teores de 3 e 5% (RAP40%+3%SSFA e RAP40%+5%SSFA). A borra do óleo de soja não foi utilizada como agente rejuvenescedor devido aos resultados discutidos no tópico 4.1.

3.2.2.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A norma DNIT 136:2018 é utilizada para o teste de resistência à tração por compressão diametral (RT) das misturas asfálticas. Neste teste, duas forças diametralmente opostas são aplicadas a um corpo de prova cilíndrico, por meio de frisos metálicos que geram tensões de tração uniformes perpendicularmente ao seu diâmetro. O carregamento estático crescente foi aplicado por meio de uma prensa mecânica, à velocidade de deformação de $0.8 \pm 0,1$ mm/s. A leitura da carga de ruptura foi feita por meio de um anel dinamométrico acoplado à prensa, e utilizou-se uma amostragem em triplicata por composição de mistura asfáltica e utilizado o valor da média dos corpos de prova (CPs) como resultado do ensaio.

3.2.2.2 DANO POR UMIDADE INDUZIDA (LOTTMAN)

O potencial de deslocamento da película de ligante asfáltico em misturas asfálticas sob a ação da água em ciclos de gelo e degelo é avaliado por meio do método de ensaio DNIT 180:2018. Este ensaio é um medidor de adesividade que considera o efeito deletério da água sobre propriedades de resistência mecânica da mistura asfáltica.

Seis corpos de prova de cada grupo de mistura asfáltica foram moldados no CGS, medindo 100 mm de diâmetro e aproximadamente 68 mm de altura. A norma DNIT 180:2018 preconiza que os corpos de prova apresentem volume de vazios de $7 \pm 0.5\%$ para esse ensaio. Para alcançar esse volume de vazios, os CPs foram compactados aplicando-se apenas 30 giros, ao invés dos 100 giros de projeto. Os CPs foram divididos em dois grupos de dois CPs cada. O primeiro grupo passou por um processo de condicionamento por ciclos gelo-degelo e um segundo grupo que não foi condicionado. Ambos foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral. A resistência à tração indireta do grupo condicionado foi referida como “ R_{Tc} ” enquanto a do grupo não-condicionado foi referida como “ R_{Tnc} ”. O resultado deste ensaio é dado pela Resistência Retida à Tração (RRT), calculada conforme a Equação 4.

$$RRT (\%) = \frac{R_{Tc}}{R_{Tnc}} \times 100 \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

- R_{Tc} = Resistência à tração indireta das amostras condicionadas (MPa);
- R_{Tnc} = Resistência à tração indireta das amostras não-condicionadas (MPa).

3.2.2.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

A rigidez das misturas asfálticas foi medida a partir do módulo de resiliência, na configuração do ensaio de compressão diametral sob carga repetida, segundo a norma DNIT 135:2018. Corpos de prova cilíndricos foram moldados no CGS, com medidas de 100 mm de diâmetro e aproximadamente 64 mm de altura. Uma carga no formato de onda *haversine* foi aplicada no plano diametral vertical do corpo de prova, utilizando a UTM-25.

A força máxima aplicada corresponde a 10% da força observada na ruptura pelo ensaio de tração por compressão diametral. A frequência de carregamento utilizada é 1Hz, onde um ciclo corresponde a 0.10 s de aplicação da carga seguido de 0.9 s de repouso. A carga aplicada gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação, resultando em um deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada. Para medição do deslocamento horizontal dos corpos de prova foram utilizados dois transdutores mecânicos-eletromagnéticos tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) presos ao corpo de prova por alças de referência. Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente de 25°C e utilizou-se no mínimo 3 amostras de cada um dos grupos de mistura asfáltica analisados.

3.2.2.4 MÓDULO DINÂMICO (MD)

O módulo dinâmico (MD) é o valor normal do módulo complexo, calculado dividindo-se a máxima tensão (pico a pico) pela deformação axial recuperável (pico a pico) para um material sujeito a uma carga senoidal. Tanto o ensaio de módulo dinâmico quanto o ensaio de módulo de resiliência oferecem estimativas da rigidez da mistura asfáltica. As principais diferenças entre os dois ensaios é que neste primeiro levam-se em conta as parcelas elásticas e não elásticas das deformações, e utilizam-se carregamentos axiais senoidais, enquanto no módulo de resiliência utilizam-se carregamentos de ondas quadradas em compressão diametral e só a parcela elástica é levada em conta no cálculo do módulo.

A determinação experimental do módulo dinâmico seguiu o método DNIT 416:2019 e foi realizado por meio da aplicação de uma tensão de compressão senoidal em um corpo de prova de 150 mm de altura e de 100 mm de diâmetro, em temperaturas e frequências de carga especificadas pela norma. A tensão aplicada e a deformação axial recuperável resultante da amostra foram medidas e usadas para o cálculo do módulo dinâmico.

A série de ensaios para o desenvolvimento das curvas mestras para a análise do desempenho da mistura foi efetuada a 4, 20 e 40°C durante o carregamento, a frequências de

0,1; 0,5; 1; 5; 10 e 25Hz para cada temperatura. Cada corpo de prova, individualmente equipado com LVDTs, foi testado para cada uma das 18 combinações de temperatura e frequência de carregamento, começando com a temperatura mais baixa e procedendo para a mais alta. O ensaio a uma dada temperatura começou com a maior frequência de carregamento e prosseguiu para a mais baixa. Para cada temperatura foi aplicada uma carga de contato (P_{min}) diferente, igual a 5% de um valor típico de carga dinâmica geralmente verificado em cada temperatura. Assim, foi possível estabelecer comparações entre as curvas mestras obtidas de todas as misturas avaliadas, de acordo com suas inclinações. Maiores inclinações ocorrem para materiais mais elásticos.

3.2.2.5 RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE (FLOW NUMBER)

O ensaio uniaxial de carga repetida foi realizado para medir a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas seguindo o método de ensaio DNIT 184:2018. Neste ensaio utilizou-se corpos de prova cilíndricos, três amostras de cada grupo, com altura de aproximadamente 150 mm e 100 mm de diâmetro moldados no CGS, com 7% de volume de vazios. Antes do ensaio, os CPs foram aquecidos em estufa a 60°C durante 3 horas.

O procedimento foi realizado usando a *Asphalt Mixture Performance Tester* (AMPT) da marca IPC Global®. Aplicou-se um carregamento uniaxial cíclico compressivo de 204 kPa no formato *haversine*, com 0.1 s de aplicação e 0.9 s de repouso. O critério de parada do ensaio foi o alcance de 7.200 ciclos de carregamento (2 horas de ensaio) ou uma deformação de 50.000 *microstrains*, na qual as amostras invariavelmente já atingiram a ruptura.

3.2.2.6 VIDA DE FADIGA

A vida de fadiga foi analisada por meio do método de ensaio DNIT 183:2018 (Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada). Igualmente ao ensaio de módulo de resiliência, corpos de prova cilíndricos compactados no CGS (100 mm de diâmetro e aproximadamente 64 mm de altura) são submetidos à compressão diametral, que gera um estado biaxial de tensão de tração perpendicular à direção da carga aplicada. A aplicação da carga foi feita usando a UTM-25, na forma pulsos de carregamento *haversine* à frequência de 1 Hz, que compreende 0.1 s de aplicação seguido de 0.9 s de descanso. No decorrer do ensaio, a deformação devido à tração aumenta até provocar a ruptura do CP ao longo da parte central do plano diametral vertical.

A deformação dos CPs foi medida por meio do sensor de descolamento do atuador da UTM. Definiu-se como critério de parada do ensaio o descolamento final do atuador de 8 mm, o qual garante a ruptura completa dos CPs. Para avaliar a vida de fadiga da mistura, registra-se o número ciclos de carregamento (N) que provoca a ruptura do CP, a cada nível de tensão. De acordo com a norma DNIT 183:2018, deve-se realizar o ensaio com quatro cargas diferentes, de forma a gerar quatro níveis de tensão cujos valores estejam entre 5% e 40% da resistência à tração indireta da mistura asfáltica.

Nesta pesquisa, escolheu-se utilizar 45%; 42.5%; 40% e 37.5% da RT de cada uma das misturas estudadas. Para cada nível de tensão, foram ensaiados dois CPs. Mocelin (2018) aponta que os ensaios de fadiga são tipicamente interpretados por meio de curvas que relacionam os níveis de tensão aplicados com o N das amostras, ajustadas por uma função exponencial, chamada de lei ou modelo de fadiga, também conhecidas como curvas de *Wöhler*. Uma vez determinados os N das amostras, plotou-se curvas desses valores versus a deformação de tração inicial (ϵ_i) e versus a diferença de tensões no centro da amostra ($\Delta\sigma$), em um gráfico log-log, para todos os níveis de tensão avaliados. Por meio de regressão linear, ajustou-se uma linha de tendência aos dados de cada mistura, a qual segue o modelo de previsão de fadiga de *Wöhler* (Equação 5 e Equação 6). De acordo com a norma do DNIT, essas regressões lineares devem apresentar R^2 mínimo de 0.8.

$$N = k_2 \left(\frac{1}{\epsilon_i} \right)^{n_2} \quad \text{Equação (5)}$$

$$N = k_3 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_3} \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

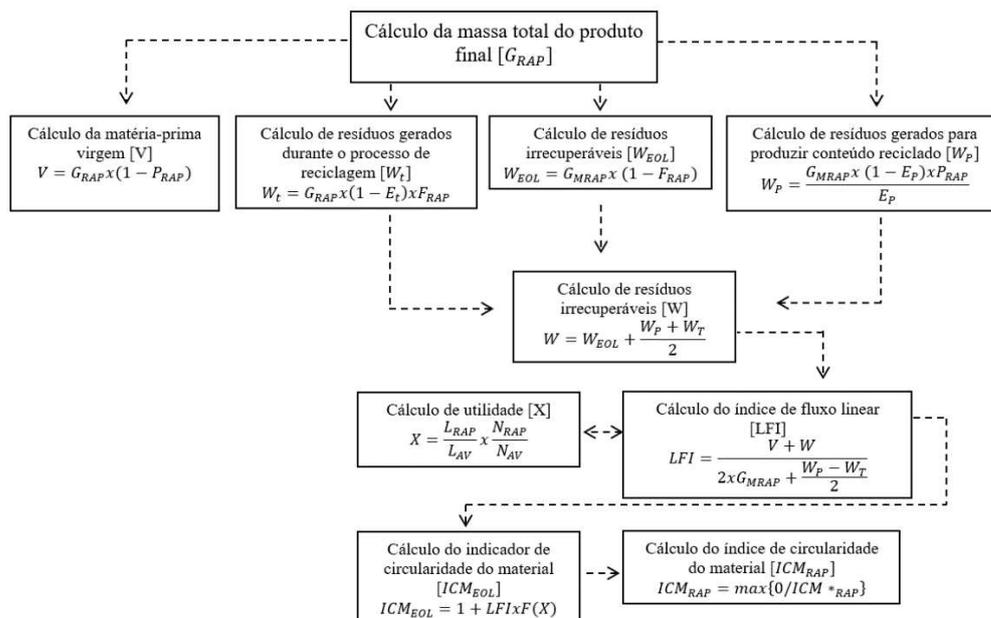
- N = número de ciclos de carregamento que leva a amostra à ruptura;
- ϵ_i = deformação resiliente inicial;
- $\Delta\sigma$ = diferença das tensões no centro do CP (MPa);
- k_i e n_i = constantes obtidas na regressão linear dos pares N;
- ϵ_i ou N e $\Delta\sigma$, características da mistura asfáltica estudada.

3.3 ANÁLISE DE CIRCULARIDADE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

O aspecto ambiental foi medido pelo conceito de Economia Circular, considerando o potencial de reutilização e reciclagem dos materiais, por meio do Índice de Circularidade do

Material (ICM) em nível de produto das misturas asfálticas recicladas. A quantificação do ICM foi realizada por meio da metodologia desenvolvida pela Fundação Ellen MacArthur (2013) e ajustada para misturas asfálticas recicladas por Mantalovas e Di Mino (2019). Os parâmetros/insumos necessários para a quantificação do ICM são apresentados na Figura 17.

Figura 17 - Definição do fluxo de cálculo dos parâmetros do ICM



Fonte: Adaptado de Mantalovas e Di Mino (2019).

Onde:

- L_{RAP} é a vida útil média real do produto.
- L_{av} é a vida útil média real de um produto médio da indústria.
- N_{RAP} é o número de ciclos de carregamento antes da falha em termos de fadiga.
- N_{av} é o número equivalente de ciclos de carregamento de um produto médio da indústria de um tipo semelhante.
- P_{RAP} é a fração de matéria-prima derivada de fontes recicladas.
- F_{RAP} é a fração da massa do produto coletado por reciclagem no fim da vida.
- $F(X)$ é o fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas.
- E_T é a eficiência do processo de reciclagem como tratamento.
- E_P é a eficiência do processo de reciclagem como produção.
- ICM_{RAP} é o índice de circularidade de RAP

O Fator de Utilidade [X] foi calculado com base nos resultados de resistência à fadiga e deformação permanente. Primeiro é determinado esses resultados dos ensaios e em seguida é calculado os fatores de utilidade, os quais foram determinados com base na metodologia apresentada na Figura 17. Para garantir uma maior utilidade das misturas asfálticas, é preferível que para o mesmo valor de micro formação, maior carga de ciclos seja alcançada em relação à resistência à fadiga, enquanto para a resistência à deformação permanente, menor profundidade de sulco é preferível para a mesma quantidade de ciclos de carregamento (MANTALOVAS, DI MINO, 2020). As fórmulas utilizadas para o cálculo dos parâmetros de desempenho dos fatores de utilidade são apresentadas nas equações 7 e 8.

$$P_F = \frac{F}{F_{av}} \quad \text{Equação (7)}$$

$$P_{DP} = \frac{1}{\frac{DP}{DP_{av}}} \quad \text{Equação (8)}$$

Onde:

- F é o número médio de ciclos de carregamento antes da falha por fadiga
- F_{av} é a vida útil média real de uma mistura asfáltica convencional (0% de RAP)
- DP é o número médio de ciclos de carregamento antes de atingir um valor específico de profundidade de sulco
- DP_{av} é o número equivalente de ciclos de carregamento de uma mistura asfáltica convencional antes de atingir o mesmo valor de profundidade de sulco.

O fator de utilidade [X] é então calculado como o produto de todos os desempenhos quantificados. Nesse estudo a fadiga e a deformação permanente foram utilizadas como parâmetro, por serem duas características independentes dos produtos finais que correspondem a diferentes tensões mecânicas. A Equação 9 apresenta a fórmula para o cálculo do fator de utilidade.

$$X = \prod_{i=1}^n [P_i] \quad \text{Equação (9)}$$

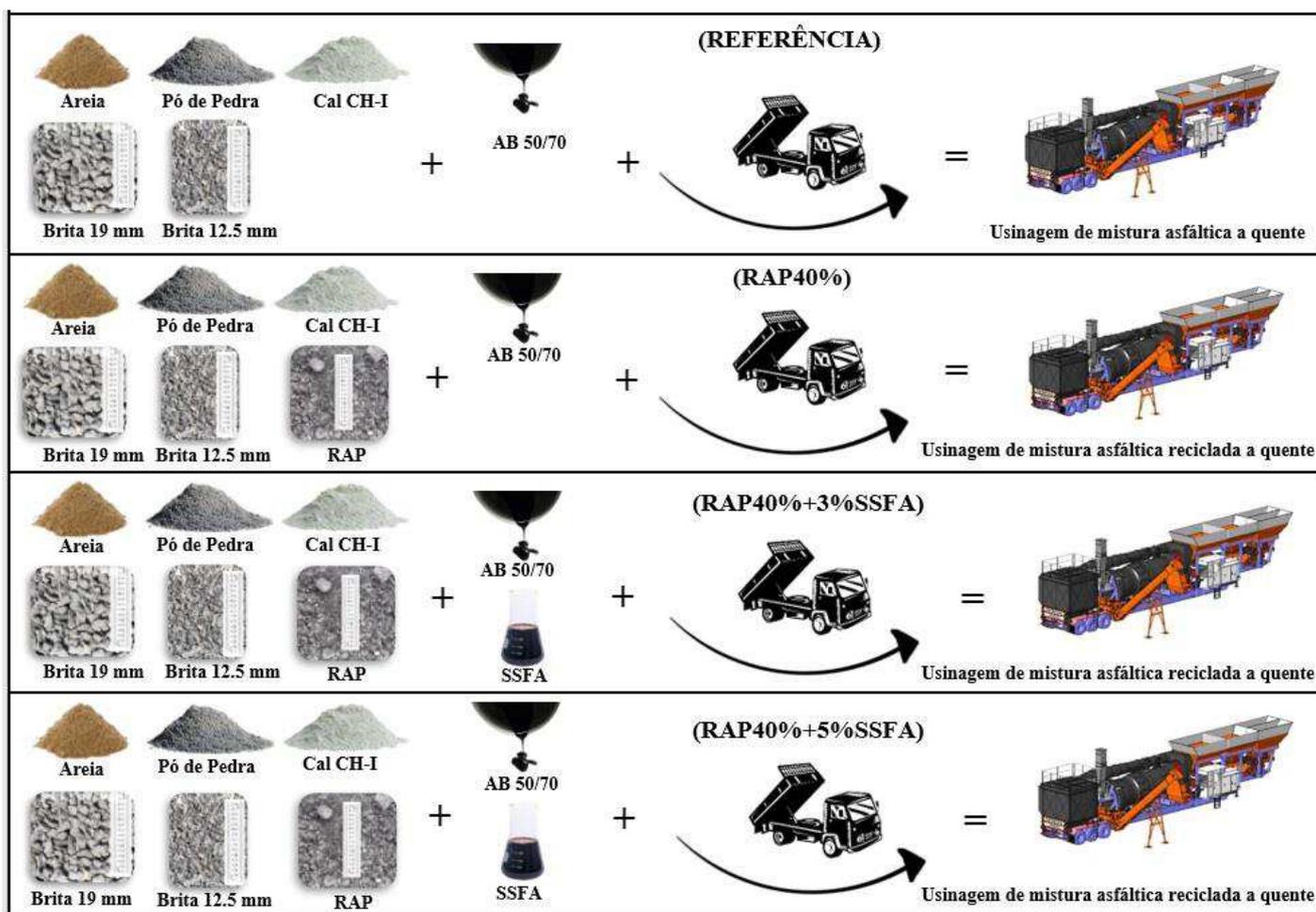
Após obtenção dos fatores de utilidade correspondentes para cada mistura asfáltica (referência, RAP40%, RAP40%+3%SSFA, e RAP40%+5%SSFA), a próxima etapa foi calcular os quatro Índices de Circularidade do Material (ICM) referentes a cada composição de mistura asfáltica, utilizando a metodologia descrita acima. Dentre as composições de misturas

analisadas, a que apresentar maior valor de ICM será considerada a mais circular entre as demais.

3.4 ANÁLISE ECONÔMICA

O estudo econômico realizado nessa pesquisa abordou o critério baseado na relação benefício-custo. Essa comparação é realizada considerando-se a “alternativa zero” como a representação da situação atual (mistura asfáltica convencional). Os resultados foram comparados em relação a esta alternativa e, a partir daí, passou-se a estabelecer uma comparação para alternativas subsequentes, até que a melhor delas fosse estabelecida. A Figura 18 apresenta a logística de produção das alternativas das misturas asfálticas avaliadas nesse estudo.

Figura 18 – Logística de produção das alternativas de misturas asfálticas analisadas



3.4.1 PRESSUPOSTOS

O estudo foi conduzido considerando os seguintes pressupostos:

- Horizonte de planejamento: 10 anos de vida útil (tempo médio de vida útil previsto pelo DNIT para as misturas asfálticas empregadas na camada de rolamento).
- Taxa de Mínima Atratividade (TMA) ou Taxa de Desconto: a Secretaria de Desenvolvimento da Infraestrutura da Secretaria Especial de Produtividade Emprego e Competitividade do Ministério da Economia (SDI/SEPEC/ME), recomenda o valor para Taxa Social de Desconto (TSD) para projetos de investimento em infraestrutura avaliados a partir de 2020 de 8.5% ao ano, onde a atualização desse valor deve ocorrer a cada dois anos.
- Índice de reajuste dos custos de manutenção e conservação: índice de reajustamento de obras rodoviárias acumulado no ano, disponibilizado pelo DNIT em dezembro de 2021 e publicado no Boletim Administrativo do DNIT nº 178 para conservação rodoviária (11.51%). Os custos envolvidos nesta etapa corresponderam apenas aos custos de recuperação da camada de revestimento asfáltico, pois as atividades de reconstrução (remoção da camada atual para construção de uma nova camada) são realizadas após o fim da vida útil da camada de rolamento da rodovia.
- Impostos e depreciação: não foi considerado nesse estudo visto que o objetivo é uma avaliação econômica.
- Receitas: os benefícios derivados são externalidades ambientais e sociais, e nessa pesquisa foram considerados como o potencial de circularidade por meio do Índice de Circularidade do Material (ICM), tratado à parte.
- Distância média para transporte dos materiais: 50 km, conforme o Manual de Custos Médios Gerenciais (DNIT, 2019), em que se adota 50 km como sendo a distância entre o canteiro aos centros fornecedores. A distância média de 50 km foi adotada para todos os materiais: agregados naturais, ligante asfáltico, RAP e SSFA.

3.4.2 DETERMINAÇÃO DOS INVESTIMENTOS

Os investimentos foram determinados para as misturas asfálticas de referência e as misturas asfálticas recicladas (RAP40%, RAP40%+3%SSFA e RAP40%+5%SSFA).

Para a obtenção do preço da tonelada da mistura asfáltica a quente tradicional elaborou-se uma composição de custo unitário apoiada no Código/Seq. 03.PAVI.USIN.006_01 dos Cadernos Técnicos de Composições para Usinagem da Caixa Econômica Federal (CEF, 2021). A descrição da composição utilizada foi a Usinagem de Concreto Asfáltico (Mistura asfáltica) com Cimento Asfáltico de Petróleo classificado com penetração 50/70 (CAP 50/70) para camada de rolamento, padrão DNIT faixa C, em usina de Asfalto Gravimétrica de 150 t/h. Esta formulação foi escolhida por ser amplamente empregada em obras de pavimentação no Brasil. O Quadro 3 apresenta a composição base para a obtenção dos custos das misturas asfálticas analisadas.

Quadro 3 - Composição base para a obtenção do custo da tonelada das misturas asfálticas

MISTURA ASFÁLTICA CONVENCIONAL - 1T (1000Kg) - USINAGEM DE CONCRETO ASFÁLTICO COM CAP 50/70 PARA CAMADA DE ROLAMENTO, PADRÃO DNIT FAIXA C, EM USINA DE ASFALTO GRAVIMÉTRICA DE 150 TON/H. AF_03/2020_P					
Código / Seq.	Descrição	Unidade			
03.PAVI. USIN.006 _01	USINAGEM DE CONCRETO ASFÁLTICO COM CAP 50/70 PARA CAMADA DE ROLAMENTO, PADRÃO DNIT FAIXA C, EM USINA DE ASFALTO GRAVIMÉTRICA DE 150 TON/H. AF_03/2020_P	T			
Código SIPCI					
101025					
Vigência: 03/2020	Última Atualização: 05/2021				
COMPOSIÇÃO					
Código	Descrição	Unid.	Quant.	R\$	Total
88316	SERVENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	0.0244	11,76	0,29
90776	ENCARREGADO GERAL COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	0.0122	16,92	0,21
100647	USINA DE ASFALTO, TIPO GRAVIMÉTRICA, PROD 150 TON/HORA - CHP DIURNO. AF_12/2019	CHP	0.0095	8756,25	83,18
100648	USINA DE ASFALTO, TIPO GRAVIMÉTRICA, PROD 150 TON/HORA - CHI DIURNO. AF_12/2019	CHI	0.0027	8756,25	23,64
5940	PÁ CARREGADEIRA SOBRE RODAS, POTÊNCIA LÍQUIDA 128 HP, CAPACIDADE DA CAÇAMBA 1,7 A 2,8 M³, PESO OPERACIONAL 11632 KG - CHP DIURNO. AF_06/2014	CHP	0.0048	565,00	2,71
5942	PÁ CARREGADEIRA SOBRE RODAS, POTÊNCIA LÍQUIDA 128 HP, CAPACIDADE DA CAÇAMBA 1,7 A 2,8 M³, PESO OPERACIONAL 11632 KG - CHI DIURNO. AF_06/2014	CHI	0.0074	565,00	4,18
7030	TANQUE DE ASFALTO ESTACIONÁRIO COM SERPENTINA, CAPACIDADE 30.000 L - CHP DIURNO. AF_06/2014	CHP	0.0244	151,91	3,71
95872	GRUPO GERADOR COM CARENAGEM, MOTOR DIESEL POTÊNCIA STANDART ENTRE 250 E 260 KVA - CHP DIURNO. AF_12/2016	CHP	0.0095	190,30	1,81
95873	GRUPO GERADOR COM CARENAGEM, MOTOR DIESEL POTÊNCIA STANDART ENTRE 250 E 260 KVA - CHI DIURNO. AF_12/2016	CHI	0.0027	190,30	0,51
41899	CIMENTO ASFALTICO DE PETROLEO A GRANEL (CAP) 50/70 (COLETADO CAIXA NA ANP ACRESCIDO DE ICMS)	T	0.0475	4700,53	223,28
370	AREIA MEDIA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)	M³	0.01786	90,00	1,61
4720	PÓ DE PEDRA - POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	M³	0.19111	82,22	15,71
4721	PEDRA BRITADA N. 1 (19 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	M³	0.05179	87,04	4,51
4721	PEDRA BRITADA N. 1 (12.5 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	M³	0.09798	87,04	8,53
1106	CAL HIDRATADA CH-I PARA ARGAMASSAS	M³	0.01727	0,68	0,01

3.4.2.1 MISTURA ASFÁLTICA DE REFERÊNCIA

Todos os custos unitários foram obtidos no Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices (SINAPI) referentes ao mês de dezembro de 2021 sem desoneração, com encargos sociais de 115.83 % para horistas e 72.25% para mensalistas. Destaca-se que o código 4720 foi ajustado à composição das misturas asfálticas utilizadas nesse estudo, substituindo a pedra britada nº 0 (pedrisco) por pó de pedra.

Para a produção da mistura asfáltica foi considerado o quantitativo de todos os agregados e ligante asfáltico. A quantidade dos agregados foi calculada com base nos percentuais determinados na dosagem da mistura e convertida de kg para m³ devido ao preço unitário estar em função do m³. O ligante asfáltico foi calculado conforme os percentuais da dosagem e convertidos para tonelada para se adequar à unidade do custo unitário do SINAPI.

Em relação ao transporte dos insumos, adicionou-se o custo de transporte dos materiais ao local de produção da mistura asfáltica. O custo de transporte dos agregados foi considerado como aquele referente ao transporte com caminhão basculante de 10 m³, em via urbana pavimentada, distância média de transporte (DMT) acima de 30 km, sendo a unidade m³ x km. O custo do transporte do ligante asfáltico foi considerado com caminhão com capacidade de 2000 litros em rodovia pavimentada para distâncias médias de transporte igual ou inferior a 100 km. A distância média de transporte (DMT) adotada foi de 50 km, a qual foi embasada no Manual de Custos Médios Gerenciais (DNIT, 2019), em que se adota 50 km como sendo a distância entre o canteiro aos centros fornecedores. Outra hipótese assumida para considerar esse valor é a condição da rodovia como sendo pavimentada. Independentemente da classe, adota-se como premissa que o transporte ocorre em rodovia pavimentada, uma vez que os fornecedores dos insumos se encontram em locais com facilidade de acesso rodoviário, possibilitando melhor fluxo dos materiais comercializados (DNIT, 2019).

O cálculo de transporte dos agregados correspondeu ao somatório do produto entre a quantidade de material em m³ e os 50 km de distância (m³ x km) e multiplicado pelo custo unitário de transporte no caminhão basculante. O transporte do ligante asfáltico foi calculado pelo produto entre a quantidade em toneladas e os 50 km de distância (t x km) e multiplicado pelo custo unitário do caminhão com capacidade de 2000 litros.

3.4.2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

Na composição das misturas asfálticas recicladas utilizou-se a mesma composição de custo unitário utilizada para a Usinagem de Concreto Asfáltico (Mistura asfáltica) com Cimento Asfáltico de Petróleo classificado com penetração 50/70 (CAP 50/70) para camada de rolamento, padrão DNIT faixa C, em usina de Asfalto Gravimétrica de 150 t/h. Entretanto, realizou-se uma adaptação adicionando o item RAP e o ácido graxo da borra do óleo de soja. O ácido graxo da borra do óleo de soja é um material comercializado por várias empresas e indústrias brasileiras produtoras de óleo de soja, e para obtenção do custo por tonelada desse material foi realizada uma pesquisa com 6 empresas no mês de janeiro de 2022 e calculada a média do custo. O custo do RAP foi considerado R\$ 0,00, pois, segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), o RAP é um resíduo sem custo comercial e o gasto para obtenção desse material é referente ao transporte até o local de produção das misturas asfálticas recicladas.

Os custos unitários dos demais materiais foram obtidos no Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices (SINAPI).

Para a produção das misturas asfálticas recicladas foi considerado o quantitativo de todos os agregados, ligante asfáltico e agente rejuvenescedor. A quantidade dos agregados foi calculada com base nos percentuais determinados na dosagem da mistura asfáltica reciclada (40% de RAP) e convertidos de kg para m³ devido ao preço unitário estar em função do m³. O ligante asfáltico e o ácido graxo da borra do óleo de soja também foi calculado conforme os percentuais da dosagem e convertidos para tonelada para se adequar à unidade do custo unitário do SINAPI.

Em relação ao transporte dos insumos, o procedimento foi o mesmo realizado para a mistura asfáltica de referência: transporte em caminhão basculante de 10 m³ para os agregados e caminhão com capacidade de 2000 litros para o ligante asfáltico e o ácido graxo da borra do óleo de soja. O cálculo de transporte dos agregados correspondeu ao somatório da multiplicação da quantidade de material em m³ pelos 50 km de distância (m³ x km) e multiplicado pelo custo unitário de transporte no caminhão basculante, e para o transporte do ligante asfáltico e do ácido graxo da borra do óleo de soja foi calculado pelo somatório da multiplicação das quantidades em toneladas pelos 50 km de distância (t x km) e multiplicado pelo custo unitário do caminhão com capacidade de 2000 litros.

3.4.3 DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS DE RECUPERAÇÃO

Os custos de recuperação foram calculados para um horizonte de 10 anos de vida útil da camada de rolamento, obtidos na literatura por meio de composições de custos de recuperação disponibilizadas pelo DNIT, em que o custo médio anual de recuperação de 1 km de rodovia é R\$ 300.000,00 (DNIT, 2021). A atividade de pavimentação corresponde a aproximadamente 30% desses custos, conforme composições de custos realizadas pelo DNIT, o que representa um custo anual de R\$ 90.000,00/km (DNIT, 2021). Como o custo de produção das misturas asfálticas nessa pesquisa foi determinado considerando 1 (uma) tonelada de mistura asfáltica, o valor foi convertido para m³.

Para a conversão, considerou-se a recuperação de uma rodovia com 7 metros de largura de faixa de rolamento, e 7.5 cm de espessura por adotar um tráfego de $10^6 < N \leq 10^7$. Assim, 1 km dessa rodovia apresenta 525 m³ (1000 m X 7 m X 0.075 m) de mistura asfáltica. Logo, o custo anual de recuperação com atividade de pavimentação de R\$ 90.000,00 corresponde a 525 m³ de mistura asfáltica.

A partir desses dados foi calculado o custo anual de recuperação referente a cada tipo de mistura utilizando o índice de reajustamento de obras rodoviárias acumulado no ano, disponibilizado pelo DNIT em dezembro de 2021 e publicado no Boletim Administrativo do DNIT nº 178 (DNIT, 2021), de 11.51%.

3.4.4 MÉTODO DE ANÁLISE

O critério utilizado para analisar os custos das diferentes composições foi o de Valor Presente Líquido (VPL). Este método caracteriza-se pela transferência para o instante presente de todas as variações de caixa esperadas, descontadas a uma Taxa de Mínima Atratividade (TMA). Isto significa o transporte para a data zero de um diagrama de fluxos de caixa, de todos os desembolsos esperados, descontados à taxa de juros considerados. A Equação 10 apresenta a formulação matemática utilizada para determinar o VPL. Para qualquer alternativa x, o valor presente líquido (VPL) dos fluxos para um período de anos n, considerando-se a taxa de descontos i, é:

$$[VPL_{x,n}]_i = \sum_{t=0}^n \frac{C_{x,t}}{(1+i)^t} \quad \text{Equação (10)}$$

Onde:

- $C_{x,t}$ é o valor do custo x na data t.

Determinou-se o VPL para todas as alternativas (mistura asfáltica de referência, RAP40%, RAP40%+3%SSFA e RAP40%+5%SSFA). Como a análise abordada nessa pesquisa inclui apenas os custos, a viabilidade econômica foi dada à alternativa que apresentou menor valor negativo.

4. RESULTADOS

Este tópico apresenta os resultados e discussões dos ensaios realizados na fase experimental dos ligantes asfálticos modificados pela adição da borra do óleo de soja e o ácido graxo da borra do óleo de soja, assim como a análise mecânica, econômica e ambiental das misturas asfálticas recicladas.

4.1 ANÁLISE EMPÍRICA FÍSICA E REOLÓGICA DO LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO

4.1.1 AVALIAÇÃO FÍSICA

A Tabela 11 apresenta os resultados empíricos físicos e reológicos das amostras de ligantes modificados ensaiados.

Tabela 11 - Resultados empíricos físicos e reológicos dos ligantes asfálticos puro e modificados

Ensaio Antes RTFO								
Resultados								
	AB	1%SS	1%SSFA	3%SS	3%SSFA	5%SS	5%SSFA	Limites
Penetração 0.1 mm (100g, 5s a 25°C)	58	54	60	59	87	61	118	50 a 70
Varição de massa do ligante (%)	0.12	0.06	0.04	0.11	0.02	0.073	0.03	≤ 0.5
Índice de suscetibilidade térmica (TSI)	-0.22	-0.62	-1.01	-0.66	-1.01	0.34	-0.24	-1.5 a +0.7
Ponto de Amolecimento (°C)	52	51	49	49	45	50	44	-
Viscosidade 135 °C	401	397.5	372.5	356.25	295	354.3	235	≥274
Rotacional 150°C	198	194	185.5	181.5	151.5	182.5	123	≥112
(cP) 177 °C	72.75	71.25	68.75	69.50	58.75	68	48.75	57 a 285
Ensaio Após RTFO								
Penetração 0.1 mm (100g, 5s a 25°C)	39	54	43	44	51	51	69	-
Ponto de Amolecimento (°C)	56	54	54	54	51	54	46	-
Aumento do Ponto de Amolecimento (°C)	4	3	5	5	6	4	2	≤8
Penetração Retida (%)	67.35	99.27	71.80	73.95	58.25	88.00	59.05	≥55
Viscosidade 135 °C	557.50	553.75	513	496.25	446	563.75	388.75	-
Rotacional 150°C	269	264.5	251	240.50	219	268.5	191.5	-
(cP) 177 °C	94	91.75	86.5	85.25	79	98.25	70.75	-

O ligante asfáltico modificado pela borra do óleo de soja apresentou um leve aumento nos valores de penetração e redução no ponto de amolecimento, antes e após RTFO, nos teores de 3 e 5%, quando comparado ao ligante puro. Estes comportamentos também foram

observados na pesquisa de Melo Neto *et al.* (2022) em que o ligante asfáltico foi modificado por óleo de copaíba e óleo de algodão. Percebe-se também que, à medida que é aumentado o teor de ácido graxo da borra do óleo de soja no ligante, a penetração apresenta um ganho mais elevado, indicando que o agente modificador proporciona uma menor rigidez ao ligante. A borra do óleo de soja não acarretou variações significativas nos resultados em relação ao ligante asfáltico puro, o que pode ser justificado pelo elevado teor de umidade que o material apresenta. Um certo percentual de umidade pode ter sido perdido no processo de modificação do ligante asfáltico, devido às temperaturas de mistura serem maiores que a temperatura de evaporação da água, apresentando comportamento e valores semelhantes em todos os teores testados por esse modificador.

A realização de testes t mostrou que, antes do RTFO, apenas duas amostras não apresentaram diferenças estatisticamente significativas, foram elas 3%SS e 1%SSFA, pois os valores de p obtidos (0.1866 e 0.0705, respectivamente) são superiores a significância (5%). Portanto, a hipótese nula de que não há diferença entre os resultados obtidos em relação ao ligante de referência (AB) é aceita. As demais amostras (1%SS, 5%SS, 3%SSFA e 5%SSFA) apresentaram resultados contrários, os valores de p encontrados (0.0116, 0.0173, 3.4×10^{-6} , 2.0×10^{-7} , respectivamente) foram inferiores a significância de 5%. Após o procedimento de RTFO, todas as amostras apresentaram aumento estatisticamente significativo nos valores de penetração quando comparados ao ligante de referência, pois todos os valores de p foram menores que a significância de 5% (p-valor de 5.1×10^{-5} , 0.0042, 0.0001, 0.0033, 9.6×10^{-5} , 3.0×10^{-6} , respectivamente as amostras de 1%SS, 3%SS, 5%SS, 1%SSFA, 3%SSFA e 5%SSFA). Esta tendência, indica que os agentes de modificação podem atuar como rejuvenescedores em misturas com elevados teores de RAP.

A penetração retida é a relação entre a penetração do ligante envelhecido (após RTFO) e do ligante antes do envelhecimento. Observa-se que dentre todas as amostras testadas, a que apresenta a menor penetração retida é a 3%SSFA, ligante asfáltico modificado com 3% de ácido graxo da borra do óleo de soja, com valor de 58.25%, seguida da amostra com 5%SSFA com valor de 59.05%, mostrando que estes foram os ligantes que mais estiveram sensíveis aos efeitos do envelhecimento. Entretanto, as demais amostras apresentaram valores de penetração retida superiores ao ligante puro, apontando menor suscetibilidade ao envelhecimento. Os resultados de testes t apontaram que as diferenças causadas pela modificação foram estatisticamente significativas, reduzindo os valores de penetração retida para as amostras com 3 e 5% SSFA (p-valor de 0.0004 e 0.0005, respectivamente) e aumentando para as amostras com 1%SS, 3%SS,

5%SS e 1%SSFA (p-valor de 2.5×10^{-6} , 0.0013, 1.4×10^{-5} e 0.0055, respectivamente). Pois, todos os valores de p obtidos são inferiores ao nível de significância de 5%. Portanto, rejeita-se a hipótese nula de que não há diferenças estatisticamente significantes entre os resultados observados.

Pontos de amolecimento menores são, de certa forma, interessantes, tendo em vista que esses modificadores podem ser empregados para uso em misturas asfálticas recicladas, confirmando a redução da rigidez a temperaturas menores. Comparando os resultados dos ligantes entre si, observa-se que os modificadores em todos os teores testados apresentaram redução do ponto de amolecimento, corroborando com os resultados de Portugal (2016) e Souza (2012) que já era um resultado a ser esperado. Os valores obtidos indicam uma tendência de diminuição do ponto de amolecimento para o AB quando este é modificado por ambos os materiais, tanto nos resultados antes quanto após o RTFO. As amostras modificadas com o ácido graxo da borra do óleo de soja (SSFA) apresentaram redução mais significativa em relação ao ligante puro, da ordem de 5.77, 13.46 e 15.44% antes do RTFO e 3.57, 8.93 e 17.86% após RTFO, para as amostras 1%SSFA, 3%SSFA e 5%SSFA, respectivamente.

Isso pode ser comprovado a partir da realização de testes t, para as amostras modificadas com a borra do óleo de soja, onde apenas a amostra com teor de 3% (3%SS) apresentou diferença estatisticamente significativa antes do procedimento de RTFO, com p-valor de 0.0213, e os demais teores com esse modificador apresentaram resultado oposto com p-valor de 0.2879 e 0.0704, para as amostras 1%SS e 5%SS. Após o RTFO nenhuma amostra modificada com a borra do óleo de soja apresentou diferença significativa em relação ao ligante de referência (AB), o p-valor obtido (0.0705) foi igual para todas as amostras e superior a significância de 5%. Para as amostras modificadas com ácido graxo da borra do óleo de soja, os resultados mostraram redução significativas no ponto de amolecimento antes do RTFO (p-valor de 0.0213, 0.0010 e 0.0006, para as amostras de 1%SSFA, 3%SSFA e 5%SSFA, respectivamente). Após o procedimento de RTFO, apenas a amostra com 1%SSFA se manteve com resultados similares aos do ligante de referência AB (p-valor de 0.0704, superior a significância de 5%), já as amostras de 3%SSFA e 5%SSFA apresentaram reduções significativas, p-valor de 0.0036 e 0.0002, com valores inferiores ao nível de significância adotado de 5%, respectivamente.

Os valores do índice de suscetibilidade térmica (TSI) podem variar entre -1,5 e 0,7; onde quanto maior o valor de TSI, menor a suscetibilidade térmica do ligante, ou seja, menos sensível à variação de temperatura. Os resultados apontam que o maior teor testado (5%) para ambos os

materiais apresentou menor suscetibilidade ao ligante asfáltico à temperatura. Sendo a amostra 5%SS a menos suscetível de todas as amostras analisadas neste estudo. Entretanto, todas as amostras apresentaram valores dentro dos limites especificados.

De acordo com os resultados da Tabela 11, observa-se que houve uma diminuição da viscosidade do ligante com o acréscimo dos teores da borra do óleo de soja e do ácido graxo da borra do óleo de soja, principalmente nas temperaturas mais baixas do ensaio. Entretanto, as amostras modificadas com a borra do óleo de soja não apresentaram redução tão significativa, sendo a amostra com 1%SS a que apresentou resultado mais próximo da amostra não modificada (AB), que pode ser justificado devido ao elevado teor de umidade na borra do óleo de soja, o que reduz o teor efetivo da borra adicionada ao ligante. Após o envelhecimento, observa-se um aumento da viscosidade em relação às amostras não envelhecidas (ligantes asfálticos modificados e não modificado). O efeito rejuvenescedor dos aditivos borra do óleo de soja e ácido graxo da borra do óleo de soja foi notável ao reduzir a viscosidade do ligante asfáltico original envelhecido. Pode-se inferir que o ácido graxo da borra do óleo de soja, rico em triglicerídeos de ácidos graxos saturados, tenha fornecido saturados e aromáticos ausentes no ligante asfáltico envelhecido, apresentando redução mais significativa da viscosidade.

Girimath e Singh (2019) apontam que os bio-óleos ricos em componentes leves têm um bom efeito rejuvenescedor e podem suavizar o ligante envelhecido, reduzindo sua viscosidade. Os ligantes asfálticos modificados com ácido graxo da borra do óleo de soja apresentaram menor viscosidade antes e após o RTFO, em destaque para as amostras com 3%SSFA e 5%SSFA. O ligante asfáltico modificado com 5%SSFA apresentou valores de viscosidade a 135°C e 177°C fora dos limites especificados em norma, o que aponta o modificador nesse teor com grande eficácia no processo de redução da rigidez, favorecendo seu uso como agente rejuvenescedor para misturas asfálticas recicladas.

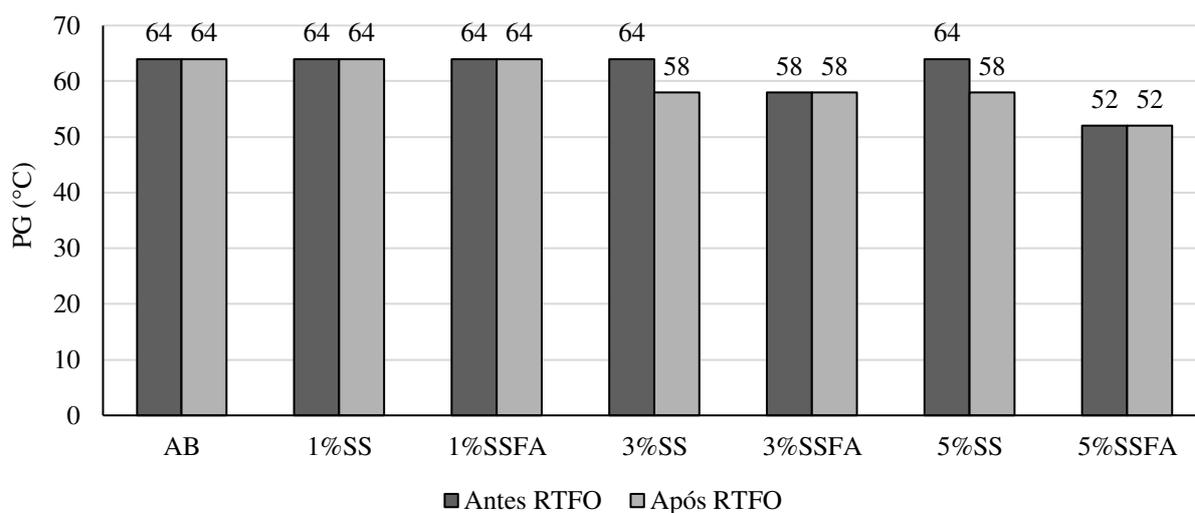
4.1.2 ANÁLISE REOLÓGICA

Os parâmetros reológicos para os ligantes puro e modificados por borra do óleo de soja e ácido graxo da borra do óleo de soja, antes e após RTFO, tais como o Módulo Complexo (G^*), que está relacionado à rigidez do ligante e, como resultado principal, o grau de desempenho (PG), que delimita a faixa de temperatura de uso mínima e máxima de utilização do ligante, foram determinados por meio dos ensaios realizados no reômetro.

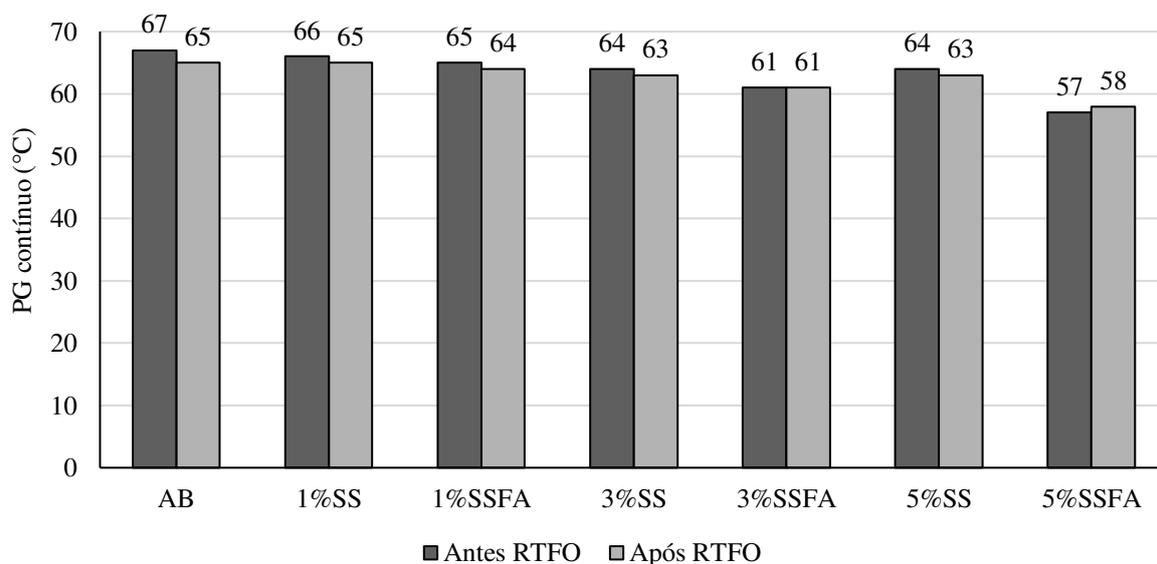
Nesse estudo foi dispensado a realização do ensaio para se determinar a temperatura mínima de PG, devido ao fato de que em países de clima tropical como o Brasil não é comum a ocorrência de temperaturas negativas, detendo-se apenas à temperatura máxima de PG. A Figura 19 apresenta os resultados das temperaturas de PG e PG contínuo de utilização do ligante asfáltico antes e após o processo de envelhecimento a curto prazo (RTFO).

Figura 19 - Grau de desempenho dos ligantes asfálticos puro e modificados: a) PG, b) PG contínuo

a)



b)



Observa-se que o ligante asfáltico modificado por 3%SS e 5%SS apresentaram uma redução na temperatura de PG após o envelhecimento, decrescendo de 64°C para 58°C, ou seja, ficaram suscetíveis ao efeito da oxidação e tiveram redução de deformabilidade e rigidez frente a altas temperaturas. Os ligantes com adição do ácido graxo da borra do óleo de soja apresentaram redução na temperatura de PG antes e após RTFO para os teores de 3 e 5%. A amostra com 3%SSFA reduziu um degrau na temperatura de PG (58°C), enquanto a amostra 5%SSFA reduziu dois degraus de temperatura passando de 64°C para 52°C, apontando o modificador como redutor de viscosidade e apresentando comportamento rejuvenescedor para uso em misturas asfálticas recicladas. Misturas asfálticas com elevados teores de RAP necessitam do uso de ligantes mais macios e menos viscosos a fim de rejuvenescer o ligante asfáltico oxidado presente no material. O ácido graxo da borra do óleo de soja apresentou-se um modificador com essas características rejuvenescedoras. Esses valores são semelhantes aos encontrados por Melo Neto *et al.* (2022) com o uso de óleo de algodão e copaíba, ressaltando que os materiais desse presente estudo são oriundos de resíduos viabilizando ainda mais o uso.

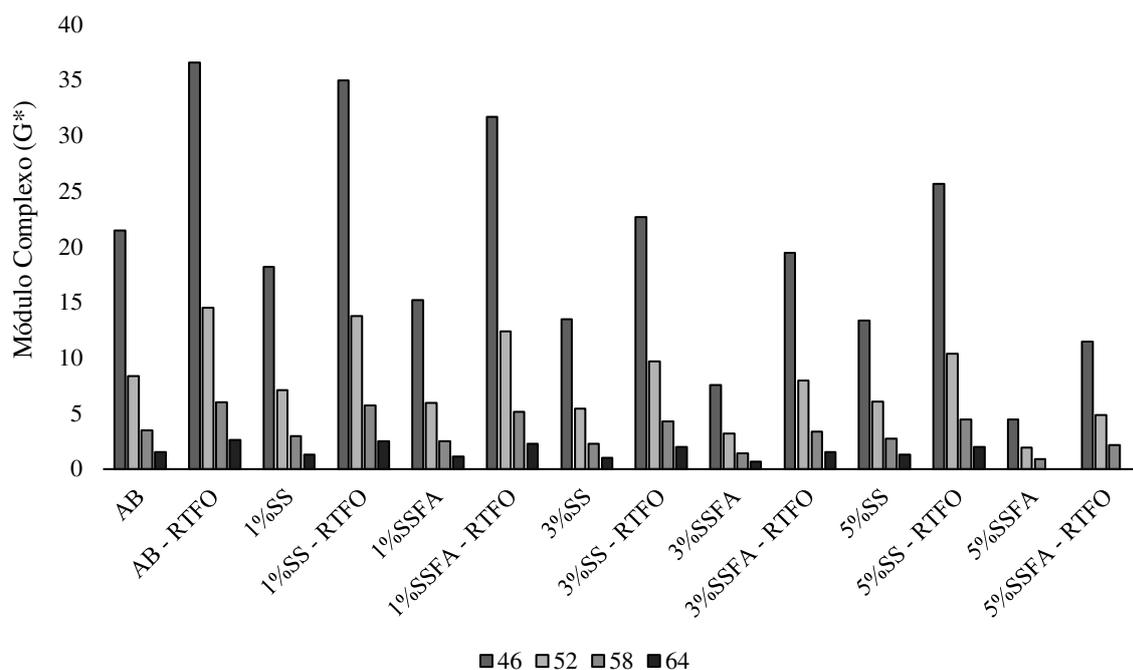
Cada classe do grau de desempenho possui uma amplitude de 6°C, ligantes de diferentes origens podem estar numa mesma classe, porém com diferenças de PG variando em até 6°C. Por isso, destaca-se a importância de se analisar os ligantes de acordo com a sua variação unitária. Esta variante do ensaio de PG possibilita uma análise mais próxima do comportamento dos ligantes asfálticos modificados com os materiais oriundos do processamento do óleo de soja. Seguindo o especificado na norma ASTM D6373:2021, utilizou-se os valores da temperatura de falha do ligante antes e após o processo de envelhecimento RTFO, conforme apresentado na Figura 3 (b). O fato de o PG variar em amplitude de 6°C também implica na determinação de graus de desempenho mais baixos do que o real. A Tabela 12 apresenta as variações de temperatura antes e após RTFO entre o PG e o PG contínuo das amostras, e pode-se notar que a variação do PG tradicional para o PG contínuo ocorre entre 0.3 a 5.9°C.

Tabela 12 - Variação das temperaturas de PG e PG contínuo nas amostras dos ligantes asfálticos

	AB		1%SS		1%SSFA		3%SS		3%SSFA		5%SS		5%SSFA	
	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)
Antes RTFO	3	4.7	2	3.1	1	1.6	0	0	3	5.2	0	0	5	9.6
Após RTFO	1	1.6	1	1.6	0	0	5	8.6	3	5.2	5	8.6	6	11.5

De acordo com a Tabela 12, observa-se que a amostra que apresentou menor variação nas temperaturas foi 1%SSFA, apontando a amostra com temperatura de PG (64°C) como a mais representativa dentre as demais amostras por possuir valor de PG próximo do seu verdadeiro ponto de falha. A Figura 20 apresenta a variação do parâmetro Módulo Complexo (G^*) das amostras em função da temperatura.

Figura 20 - Parâmetro Módulo Complexo (G^*) em função da temperatura antes e após RTFO

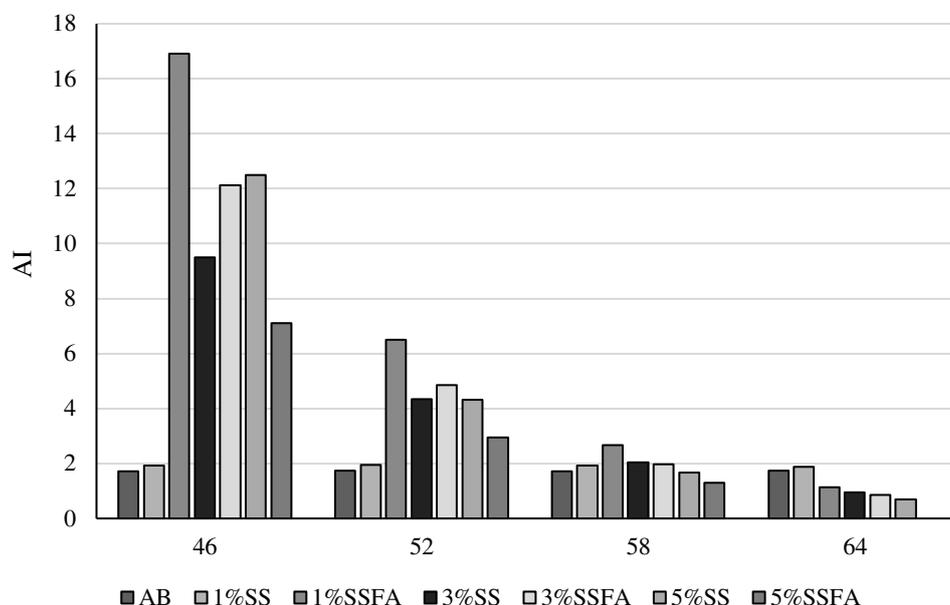


Em relação ao ligante asfáltico puro (AB), os ligantes asfálticos modificados apresentaram módulos complexos menores com a elevação da temperatura. Estes resultados apontam uma menor rigidez dos ligantes com adição dos modificadores derivados do processamento do óleo de soja, especialmente os modificados com ácido graxo da borra do óleo de soja. Assim, o desempenho dos ligantes modificados, considerando o comportamento reológico, foi inferior ao ligante puro.

A pesquisa de Melo Neto *et al.* (2022) corrobora novamente com os resultados deste estudo, ou seja, uma menor rigidez ao ligante com adição de bio-óleos e redução da temperatura. Após o envelhecimento a curto prazo, observa-se, em geral, um aumento no valor do Módulo Complexo das amostras analisadas. De forma clara, os valores do Módulo Complexo de todas as amostras de ligantes modificados permaneceram com valores inferiores aos da amostra de ligante asfáltico puro (AB), indicando uma perda de rigidez.

A Figura 21 apresenta os valores do índice de envelhecimento (AI) obtidos por meio da relação entre os parâmetros $G^*/\text{sen}\delta$ dos ligantes antes e após o procedimento de envelhecimento em estufa RTFO, para cada temperatura de aferição dos parâmetros.

Figura 21 - Índice de envelhecimento (AI) das amostras de ligante asfáltico



A incorporação da borra do óleo de soja (SS) e o ácido graxo da borra do óleo de soja (SSFA) acarretou suscetibilidade ao ligante asfáltico à oxidação e volatilização dos componentes químicos nas temperaturas de 46°C e 52°C, mas a partir da temperatura de 58°C as amostras apresentaram tendência à diminuição à oxidação com a presença dos modificadores. A partir dos dados obtidos apresentados na Figura 21, pode-se apontar que os modificadores apresentaram melhor desempenho nas maiores temperaturas testadas, inferindo uma boa atuação dos modificadores no ligante asfáltico em temperaturas mais altas.

A realização do ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR) possibilitou a avaliação do percentual de recuperação (%R - onde é fornecido dados da elasticidade), da compliância não-recuperável (Jnr - que apresenta dados da suscetibilidade ao acúmulo de deformação permanente, menores valores de Jnr indicam resistência do ligante a este efeito) e a diferença percentual entre as compliâncias não-recuperáveis (Jnr, diff - a qual fornece dados quanto à sensibilidade ao aumento do nível de tensão). A Tabela 13 apresenta os dados do ensaio MSCR realizados na temperatura máxima de PG do ligante asfáltico (64°C), mas o teste também foi realizado nas amostras 3%SSFA e 5%SSFA nas temperaturas máximas

de PG obtidas para elas, que apresentaram temperatura máxima menor em relação às demais amostras.

Tabela 13 - Parâmetros obtidos no teste de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR)

Amostra	Ensaio (°C)	Percentual de recuperação (%)		Complância não recuperável Jnr (kPa ⁻¹)		Jnr, diff (%)
		0.1 kPa	3.2 kPa	0.1 kPa	3.2 kPa	
AB	64	5.03	0.37	3.4	3.83	12.68
1%SS	64	1.93	0.27	3.9	4.21	8.01
1%SSFA	64	-1.16	0.19	4.45	4.62	3.9
3%SS	64	9.34	1.5	1.88	2.27	20.91
3%SSFA	64	1.4	-0.19	7.82	8.5	8.75
5%SS	64	3.03	0.9	2.15	2.3	6.63
5%SSFA	64	0.8	-0.79	13.5	14.7	8.84
3%SSFA	58	-0.25	0.61	3.04	3.13	3.19
5%SSFA	52	1.94	1.16	1.94	2.04	4.98

O objetivo da análise do ligante asfáltico modificado com os materiais derivados do processamento do óleo de soja foi verificar o potencial desses materiais como agentes rejuvenescedores para misturas asfálticas recicladas. Portanto, os altos valores de Jnr obtidos serão compensados no produto final do ligante asfáltico presente na mistura asfáltica reciclada, tendo em vista que o Jnr do ligante asfáltico recuperado apresentou valores bem abaixo desses.

Um teste t indicou que as diferenças obtidas foram estatisticamente significativas para o nível de tensão de 0.1 kPa (p-valor de 0.0036, 4.9×10^{-5} , 0.0001, 0.0002, 6.9×10^{-7} , 2.5×10^{-8}) e para o nível de tensão de 3.2 kPa (p-valor de 0.0096, 4.4×10^{-5} , 4.7×10^{-5} , 0.0006, 5.5×10^{-7} , 1.9×10^{-8}), respectivamente para as amostras de 1%SS, 3%SS, 5%SS, 1%SSFA, 3%SSFA e 5%SSFA. Pois, todos os valores de p obtidos foram inferiores a significância de 5%, rejeitando-se a hipótese nula de que não existe diferença estatística entre os resultados obtidos.

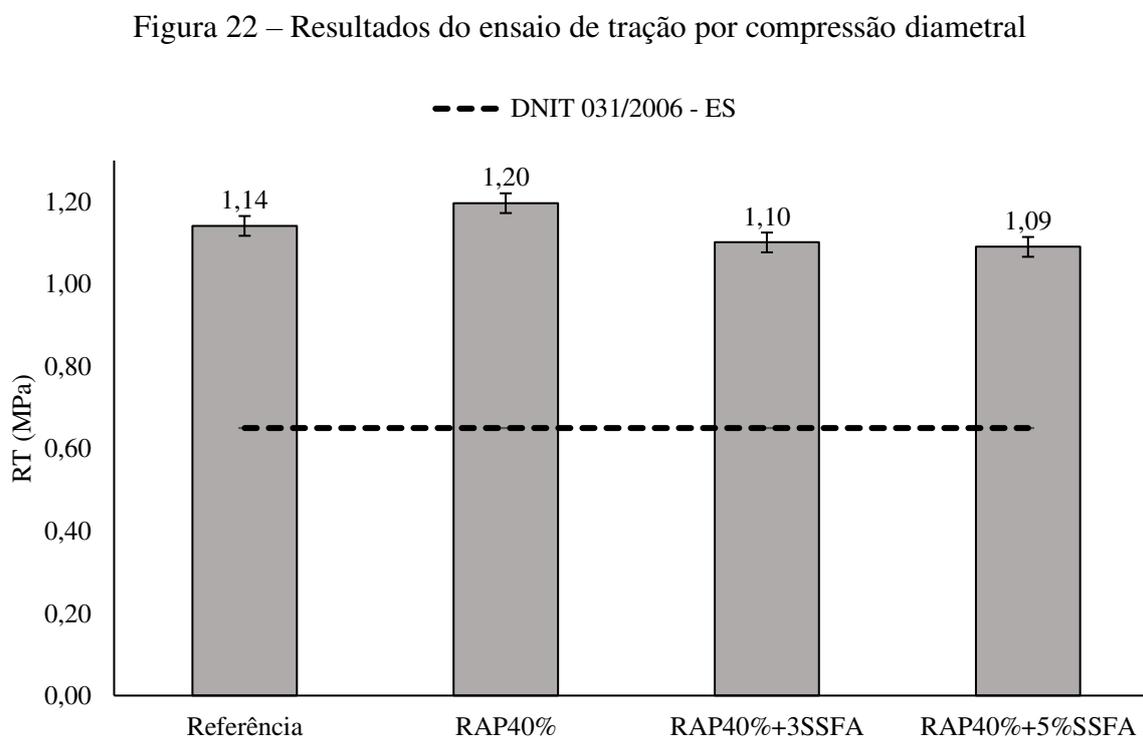
Outro parâmetro importante do ensaio MSCR é o Jnr diferencial (Jnr, diff), que é a medida da diferença entre o Jnr a 0.1 kPa e a 3.2 kPa, expresso em porcentagem. Os valores de Jnr, diff para os ligantes asfálticos puro e modificados têm a função de mostrar a sensibilidade dos materiais ao aumento dos níveis de tensão e deve permanecer abaixo de 75%, conforme AASTHO M320 (2017). Portanto, na faixa de temperatura estudada, observa-se que tanto o ligante asfáltico puro quanto os modificados por borra do óleo de soja e ácido graxo da borra do óleo de soja apresentaram valores inferiores ao limite de 75%, evidenciando que os materiais são adequados para utilização nessas faixas de temperatura.

4.2 ANÁLISE MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

Esta seção apresenta os resultados e discussões dos ensaios mecânicos referentes à mistura asfáltica de referência e às misturas asfálticas recicladas. Na composição das misturas asfálticas recicladas utilizou-se como modificador apenas o ácido graxo da borra do óleo de soja que, conforme os dados reológicos, apresentou redução da temperatura máxima de PG (°C) nos teores de 3% e 5% para 58°C e 52°C, respectivamente. A redução da temperatura de PG foi importante para que maiores teores de RAP pudessem ser inseridos na produção das misturas asfálticas recicladas. O teor de RAP utilizado (40%) foi definido com o menor valor de PG (52°C) obtido.

4.2.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Figura 22 apresenta os valores médios da resistência à tração por compressão diametral (RT) dos 4 grupos de misturas asfálticas analisados, juntos com os respectivos desvios-padrão.



Verifica-se que todas as amostras apresentaram valores de RT que atendem à tensão mínima de 0.65 MPa exigida pela especificação de serviço para misturas asfálticas DNIT 031/2006. A adição do agente rejuvenescedor quase não alterou o resultado e desempenho da mistura asfáltica quanto à resistência à tração. A mistura RAP40%+3%SSFA apresentou uma redução de 8.3% e 3.5% em relação às misturas RAP40% e de referência, respectivamente. A mistura RAP40%+5%SSFA apresentou valor bem próximo à outra mistura reciclada com 3%SSFA, com redução de 9.2% e 4.4% em relação às misturas RAP40% e de referência.

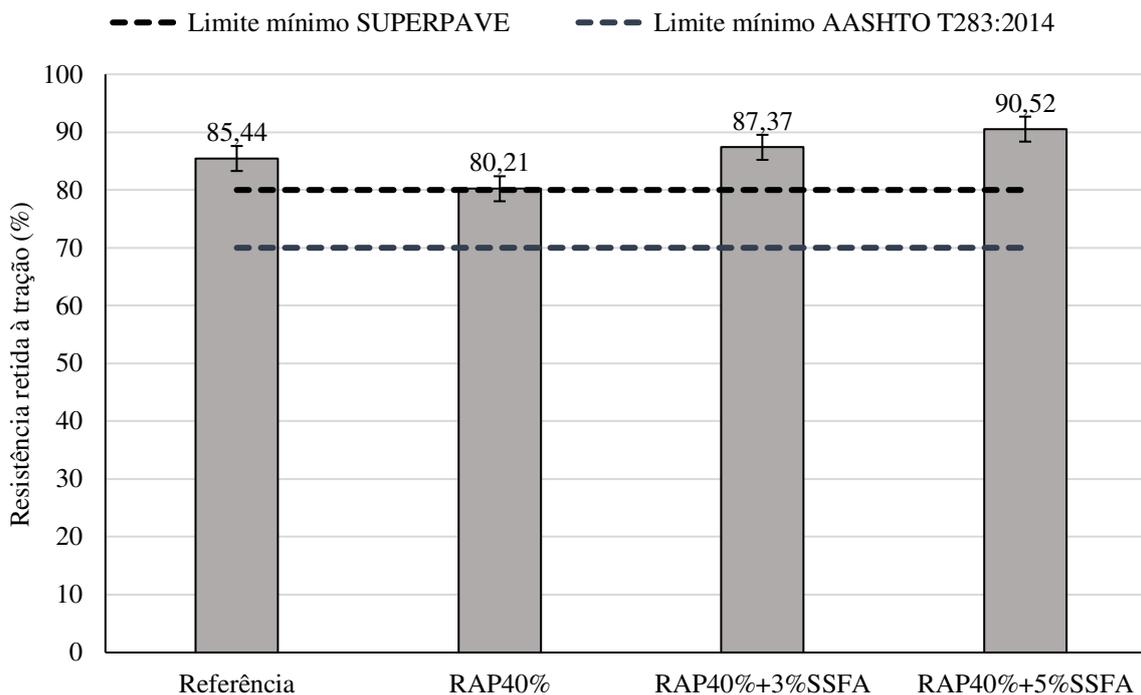
Portanto, pode-se afirmar que as misturas asfálticas recicladas modificadas com o ácido graxo da borra do óleo de soja apresentaram baixa redução da resistência à tração em relação à mistura asfáltica reciclada sem agente rejuvenescedor e à mistura asfáltica de referência. Esses resultados corroboram com o estudo de Pradhan e Sahoo (2020), onde foi observado uma redução de 15.24% no valor de RT para a mistura reciclada com 40% de RAP e agente rejuvenescedor (óleo de undeira) em relação à mistura reciclada com 40% de RAP e sem agente rejuvenescedor.

4.2.2 DANO POR UMIDADE INDUZIDA (*LOTTMAN*)

A Figura 23 apresenta os valores médios da resistência retida à tração (RRT) das misturas asfálticas avaliadas.

Para a metodologia SUPERPAVE, o valor de RRT mínimo para que a suscetibilidade à umidade da mistura asfáltica seja considerável aceitável é 80%. Entretanto, a norma AASHTO T 283:2014 e a norma DNIT 031/2006 adotam 70% como valor mínimo de RRT para misturas asfálticas. Todas as amostras analisadas satisfizeram os critérios estabelecidos.

Figura 23 - Resultados do dano por umidade induzida



A mistura asfáltica reciclada sem agente rejuvenescedor apresentou a menor resistência retida à tração. Entretanto, as misturas asfálticas recicladas com o ácido graxo da borra do óleo de soja apresentaram os melhores resultados. Em relação à mistura asfáltica de referência, as misturas recicladas apresentaram valores próximos, onde a mistura RAP40% apresentou uma redução de apenas 6.12%, e as misturas RAP40%+3%SSFA e RAP40%+5%SSFA aumento de 2.26% e 5.35%, respectivamente. As misturas com ácido graxo da borra do óleo de soja, RAP40%+3%SSFA e RAP40%+5%SSFA, apresentaram aumento de 8.93% e 12.85% em relação à mistura RAP40%.

Esses resultados corroboram com Pradhan e Sahoo (2020) que analisaram a suscetibilidade de misturas asfálticas recicladas com diferentes teores de RAP (30, 40, 50, 60 e 70). Os autores apontaram que a incorporação de 30-40% de RAP acarretaram aumento da resistência retida à tração das misturas, mas à medida que se aumentou o teor de RAP a partir de 50% os valores reduziram. Todas as composições avaliadas também apresentaram RRT acima de 80%. Cooper *et al.* (2017) também observaram melhor resistência à suscetibilidade à umidade no caso de misturas recicladas em comparação com à mistura asfáltica convencional.

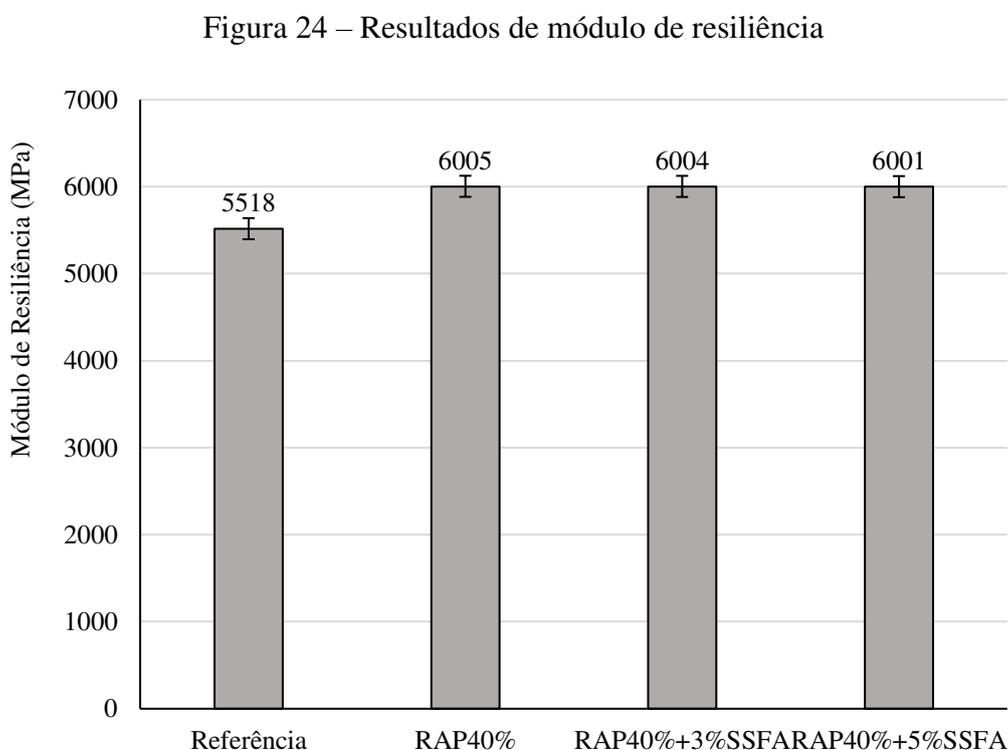
Goli e Latifi (2020) estudaram misturas asfálticas produzidas com agregado calcário e misturas recicladas com 40% de RAP. Quatro composições de misturas foram analisadas: mistura convencional com agregados calcário e ligante virgem, mistura convencional com

agregado calcário e ligante modificado por 3% do aditivo Sasobit, mistura reciclada com 40% de RAP e ligante virgem, e por fim mistura asfáltica reciclada com 40% de RAP e ligante modificado por 3% de Sasobit. Os resultados da pesquisa também corroboram com os dados obtidos nesse estudo. A incorporação do agente rejuvenescedor melhorou a resistência retida à tração da mistura asfáltica reciclada, e todas as composições apresentaram RRT acima de 80%.

Yousefi *et al.* (2021) investigaram a suscetibilidade à umidade de composições de misturas asfálticas modificadas com Sasobit, Zeolite, Kaowax e PAWMA, assim como misturas asfálticas recicladas com 50% de RAP com e sem os aditivos anteriormente citados. Todos os aditivos testados, exceto o PAWMA, provocaram redução da RRT às misturas asfálticas recicladas, podendo inferir que o tipo de aditivo influencia na suscetibilidade da mistura reciclada à umidade.

4.2.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

A Figura 24 apresenta os resultados de módulo de resiliência (MR) para as misturas asfálticas de referência e recicladas.



Observa-se que a adição do RAP aumentou o módulo de resiliência das misturas asfálticas. Entretanto, a incorporação do agente rejuvenescedor não alterou o módulo de resiliência em relação à mistura asfáltica reciclada sem agente rejuvenescedor. A mistura asfáltica reciclada sem ácido graxo da borra do óleo de soja apresentou um aumento de 8.82% em relação à mistura asfáltica de referência.

O aumento nos valores de MR nas misturas asfálticas recicladas em relação à mistura asfáltica de referência pode ser explicado devido à elevada rigidez que o RAP apresenta, e a redução das misturas recicladas com ácido em relação à mistura reciclada sem aditivo se explica pelo efeito amolecedor e redutor de rigidez que o modificador proporciona ao RAP. Os dados corroboram com o estudo de Goli e Latifi (2020) com misturas asfálticas convencional (produzida com agregado de calcário) e reciclada com 40% de RAP. Os autores constataram um aumento nos valores de módulo de resiliência em relação à mistura asfáltica convencional.

Yousefi *et al.* (2021) analisaram misturas asfálticas recicladas com 50% de RAP com diferentes aditivos (PAWMA, Kaomax, Sasobit e Zeolite) e observaram aumento do módulo de resiliência a 25°C para todas as misturas asfálticas recicladas modificadas em relação à mistura asfáltica reciclada sem aditivo; em destaque para o aditivo Sasobit. Esse comportamento não foi observado nesse estudo, mas os valores das misturas asfálticas recicladas modificadas (RAP40% + 3%SSFA e RAP40% + 5%SSFA) foram bem próximos ao da mistura asfáltica reciclada sem aditivo (RAP40%).

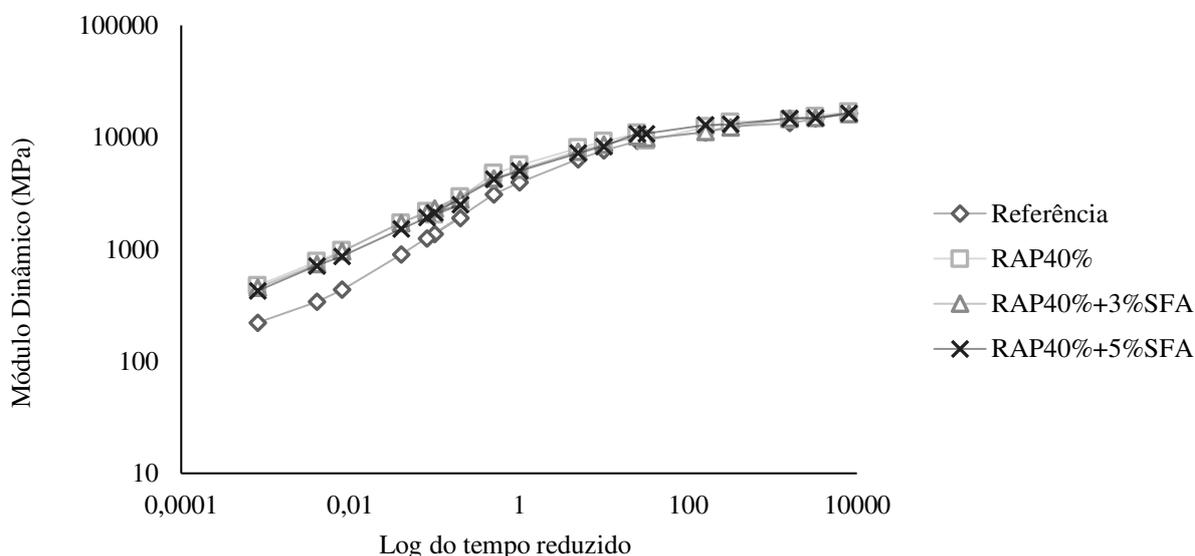
Os valores próximos de MR obtidos para as misturas asfálticas recicladas com ácido graxo da borra do óleo de soja pode ser justificado pelos teores utilizados na modificação do ligante asfáltico (AB) serem valores bem próximos (3 e 5%), corroborando com os dados semelhantes encontrados nos nesses teores no testes físico-reológicos para o ligante modificado por esse aditivo. No entanto, devido à pequena diferença nos resultados destas amostras, um estudo com maior variabilidade de teores de modificação é necessário para se aprofundar na análise.

4.2.4 MÓDULO DINÂMICO

A Figura 25 apresenta as curvas mestras determinadas no ensaio de módulo dinâmico em temperatura de referência de 20°C, utilizando três temperaturas (4, 20 e 40°C) e seis frequências (0.1; 0.5; 1; 5; 10 e 25Hz).

Todas as misturas apresentaram redução de rigidez devido ao aumento de temperatura. Além disso, as curvas mestras das misturas asfálticas recicladas mostraram a mesma magnitude e tendência de variação. Portanto, pode-se apontar que a rigidez das misturas recicladas foi pouco afetada pela variação da composição com a adição do agente rejuvenescedor. A mistura asfáltica de referência apresentou menor módulo dinâmico, enquanto a mistura RAP40% sem agente rejuvenescedor apresentou maior valor. A incorporação do RAP à mistura asfáltica aumentou a rigidez da mistura e o módulo dinâmico melhorou. A adição do agente rejuvenescedor acarretou pequena diminuição do módulo dinâmico em relação à mistura asfáltica reciclada sem o aditivo, apresentando valores maiores que a mistura de referência.

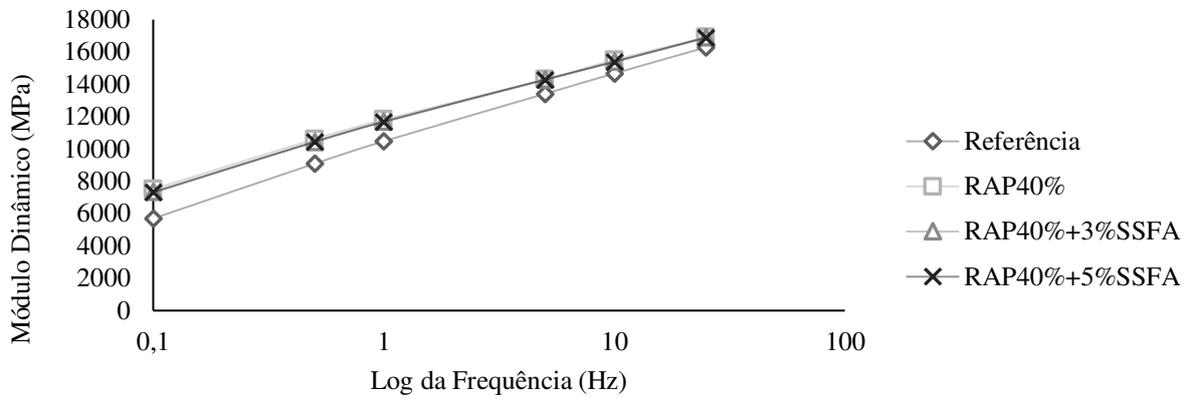
Figura 25 - Curvas mestras das misturas analisadas



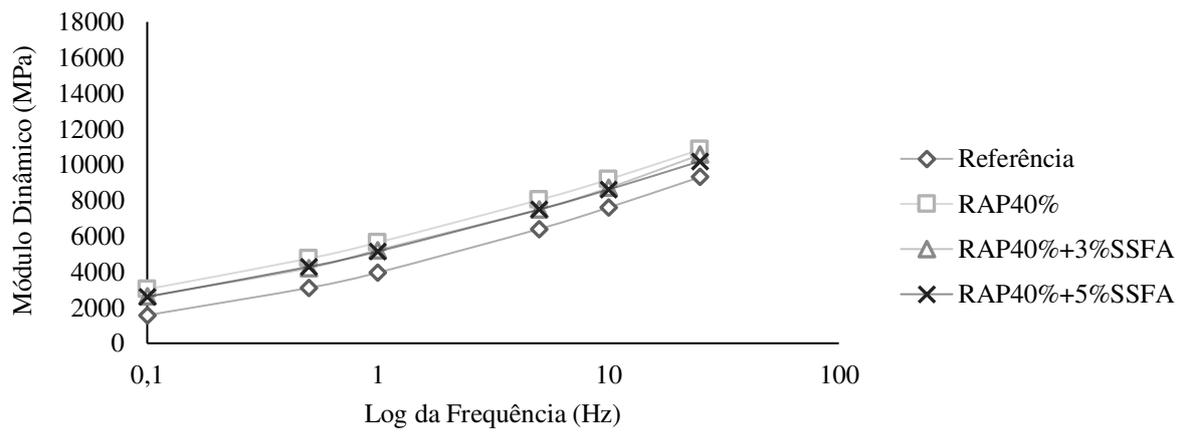
A Figura 26 apresenta os resultados do ensaio de módulo dinâmico, que é definido como a tensão máxima para a amplitude da deformação aplicada, que reflete a rigidez do corpo de prova avaliado, de todas as misturas asfálticas por temperatura de ensaio. Percebe-se que a incorporação do RAP afetou o parâmetro de rigidez da mistura asfáltica avaliada por meio da aplicação de carga senoidal em diferentes frequências, sendo a mistura RAP40% a que apresentou maiores valores de módulo dinâmico e a mistura de referência os menores valores em todas as temperaturas analisadas.

Figura 26 - Módulo dinâmicos das misturas asfálticas: a) 4°C, b) 20°C, c) 40°C

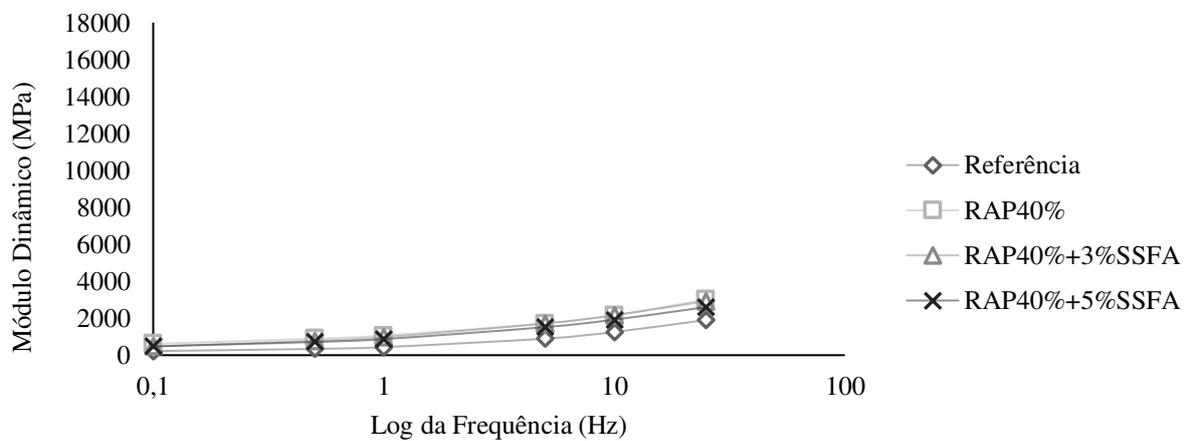
a)



b)



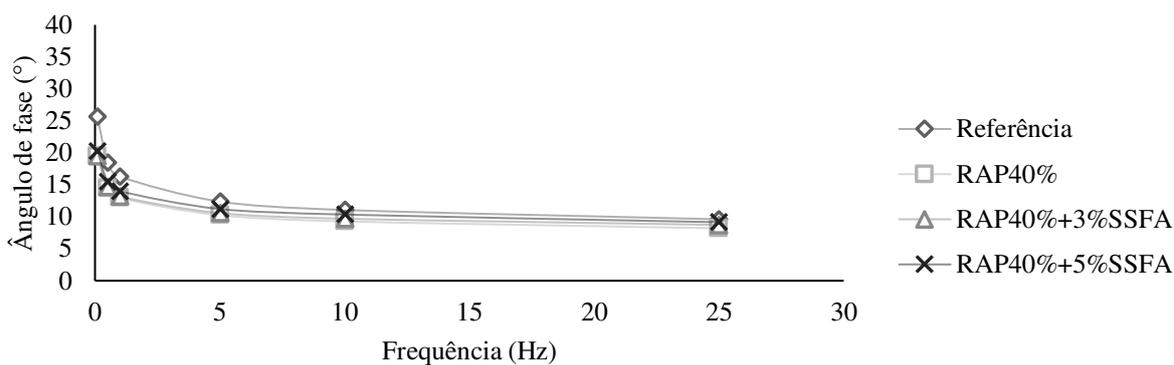
c)



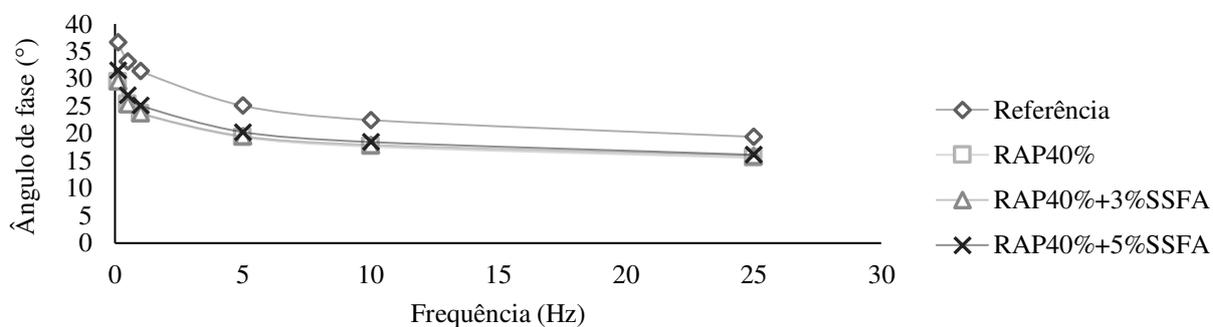
A Figura 27 apresenta os ângulos de fase referentes às frequências de carregamento de todas as misturas asfálticas analisadas nesse estudo, em cada temperatura de ensaio. O ângulo de fase é o intervalo de tempo entre a tensão aplicada e a tensão de resposta. Este parâmetro representa a viscoelasticidade das misturas asfálticas.

Figura 27 - Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento: a) 4°C, b) 20°C, c) 40°C

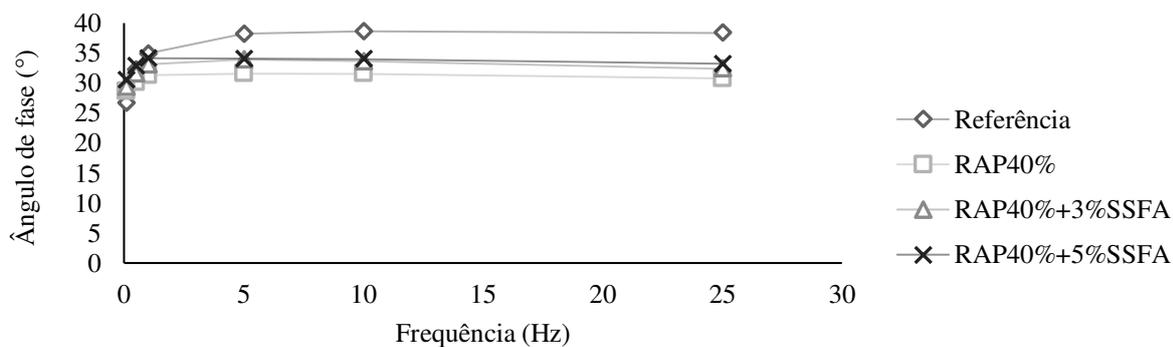
a)



b)



c)



Para todas as misturas asfálticas avaliadas, observou-se inicialmente que o ângulo de fase aumenta com o aumento da temperatura e diminui com o aumento da frequência. No entanto, essa tendência acontece até a temperatura atingir 40°C, pois nesta foi verificado que o ângulo de fase diminuiu em baixas frequências para essa temperatura mais elevada.

A incorporação do rejuvenescedor restaurou até certo ponto a viscoelasticidade das misturas asfálticas recicladas, mas todos os valores foram inferiores aos da mistura asfáltica de referência. O Ângulo de fase da mistura asfáltica com 5% de ácido graxo da borra do óleo de soja foi maior que a mistura com 3%, indicando que a maior quantidade de agente rejuvenescedor pôde recuperar melhor o comportamento de viscoelasticidade da mistura asfáltica reciclada. Esse comportamento corrobora com os resultados obtidos nos ensaios reológicos dos ligantes modificados. O ligante asfáltico com 5% de SSFA apresentou a maior redução de viscosidade e menor módulo complexo (G^*), apontando a maior diminuição de rigidez dentre as amostras analisadas seguida do ligante com 3%SSFA.

Segundo Ali *et al.* (2016), o ângulo de fase aumenta em menor temperatura, o que sugere que a maior parte da energia é dissipada no comportamento viscoelástico da mistura, o que implica dizer que a relação entre o ângulo de fase em baixa temperatura e alta frequência é atribuída ao ligante, seguindo a tendência deste. O ângulo de fase a alta temperatura e baixa frequência é afetado pelo agregado e a maior parte da energia é atribuída à interação ligante-agregado que tende a diminuir o ângulo de fase.

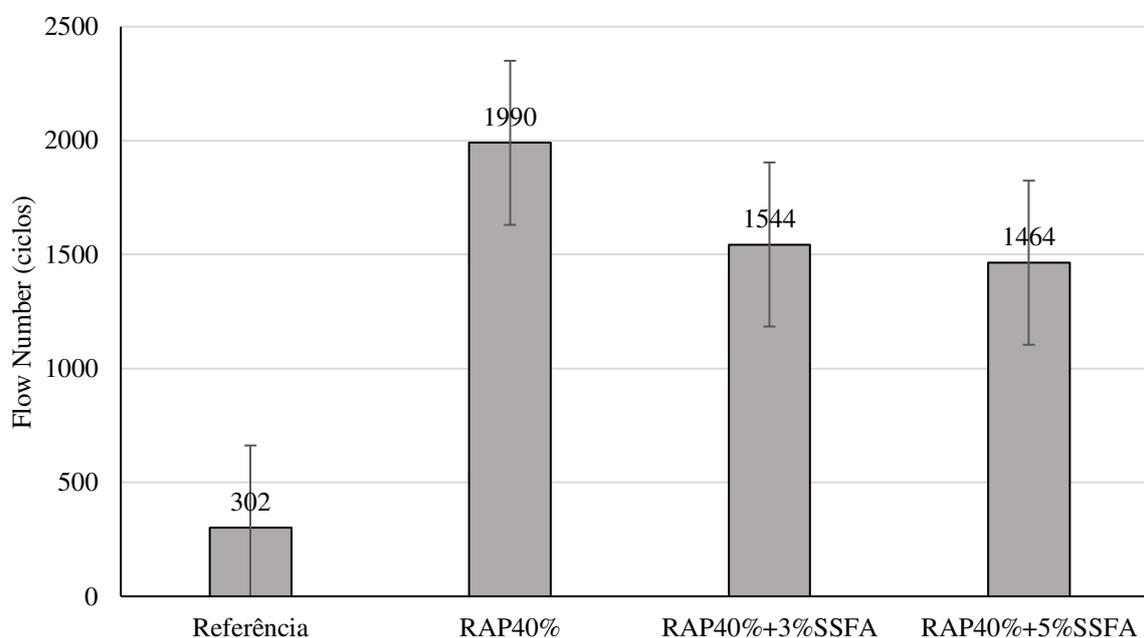
Zhang *et al.* (2021c) realizaram um estudo com misturas asfálticas recicladas com 40 e 60% de RAP com um agente rejuvenescedor composto (óleo aromático + plastificante + agente anti-defasagem, na proporção 100:10:2) em teores de 10 e 12% por peso de ligante asfáltico virgem. Os resultados obtidos apontaram que o agente rejuvenescedor nos teores testados apresentou valores semelhantes na mistura reciclada com 40 e 60%, ou seja, a variação de 2% de agente rejuvenescedor não alterou o desempenho da mistura, o que foi observado também nesse estudo com 3 e 5% de ácido graxo da borra do óleo de soja. Outro ponto que corrobora com a pesquisa supracitada é de que os maiores ângulos de fase foram obtidos para a mistura asfáltica de referência e os menores para a mistura reciclada sem agente rejuvenescedor (RAP40%), o que pode ser atribuído ao fato de que a incorporação do RAP aumentou a rigidez das misturas asfálticas recicladas e fez com que elas se comportassem com mais elasticidade.

Pode-se resumir que o RAP pode aumentar a rigidez e elasticidade de misturas asfálticas recicladas em temperaturas de serviço moderadas e altas. A incorporação dos rejuvenescedores (3%SSFA e 5%SSFA) restauraram até certo ponto a resposta dinâmica das misturas asfálticas recicladas, mas pôde garantir o desempenho das misturas relacionadas.

4.2.4 RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE (*FLOW NUMBER*)

A Figura 28 apresenta os valores médios do *Flow Number* (FN) das misturas asfálticas analisadas nesse estudo.

Figura 28 - Valores do *Flow Number* obtidos pelo ensaio uniaxial de carga repetida



As misturas asfálticas recicladas apresentaram valores maiores em relação à mistura asfáltica de referência, ou seja, apresentaram maior resistência à deformação permanente. A redução dos valores médios das misturas recicladas com o agente rejuvenescedor ácido graxo da borra do óleo de soja em relação à mistura reciclada sem aditivo foi de 11.73% e 19.99% para as misturas RAP40%+3%SSFA e RAP40%+5%SSFA, respectivamente.

A adição do RAP à mistura asfáltica a quente aumentou a resistência à deformação permanente em 558.9%, 411.3% e 384.8% nas misturas RAP40%, RAP40%+3%SSFA e RAP40%+5%SSFA, respectivamente. O efeito do enrijecimento do RAP pode ser a justificativa do ganho na resistência à deformação permanente em relação à mistura de

referência. A incorporação do agente rejuvenescedor nas misturas asfálticas recicladas reduziu a resistência à deformação permanente devido ao efeito de amolecimento.

Os resultados obtidos nesse ensaio corroboram com os dados de Jnr a 3.2 kPa dos ligantes asfálticos utilizados na produção dessas misturas asfálticas. O ligante do RAP apresentou um Jnr de 2.30 kPa⁻¹, comprovando sua rigidez e resistência à deformação permanente. Entretanto, a mistura asfáltica de referência foi produzida com o ligante virgem (AB) que apresentou Jnr de 3.83 kPa⁻¹, indicando maior suscetibilidade à deformação permanente. Os ligantes modificados com 3% e 5% de SSFA apresentaram Jnr altos, da ordem de 8.5 kPa⁻¹ e 14.7 kPa⁻¹ respectivamente.

A rigidez apresentada pelo RAP foi reduzida com o uso dos ligantes modificados por SSFA, mas ainda apresentaram resistência à deformação permanente superior à mistura de referência. Assim, pode-se apontar a necessidade do uso de agente rejuvenescedor para redução da elevada rigidez do RAP, ou seja, à medida que se aumenta a quantidade de RAP na mistura asfáltica mais macio deve ser o ligante asfáltico utilizado.

Resultados semelhantes aos dessa pesquisa também foram observados em outros estudos. Pradhan e Sahoo (2020) apontaram que a adição nas misturas asfálticas de 40% de RAP com agente rejuvenescedor do tipo óleo de undeira (*Calophyllum inophyllum*) diminuíram a profundidade de deformação cerca de 22.22% em relação à mistura asfáltica tradicional. Chen *et al.* (2021) obtiveram um ganho de 633.7% de resistência à deformação permanente em misturas asfálticas recicladas com 50% de RAP sem agente rejuvenescedor. Yousefi *et al.* (2021) apontam um aumento de resistência à deformação permanente com adição de 50% de RAP na ordem de 332.2% sem agente rejuvenescedor, e à medida que adicionou agentes rejuvenescedores em teores distintos (3% Sasobit, 5% Zeolite, 2% Kaomax e 0.3% Pawma), a amostra que apresentou menor valor de Flow Number entre essas foi com o rejuvenescedor Zeolite, mas mesmo assim apresentou valor superior que a mistura asfáltica tradicional.

Nascimento (2008) aponta que misturas asfálticas densas dosadas para suportar tráfego médio (3×10^6 a 1×10^7 ESALs) devem apresentar FN mínimo de 300 ciclos, enquanto que para misturas destinadas ao tráfego pesado (1×10^7 a 3×10^7 ESALs), esse valor é 750. Portanto, as misturas asfálticas recicladas apresentaram valores que suportam tráfego pesado, e a mistura asfáltica de referência tráfego médio.

4.2.5 VIDA DE FADIGA

As Figuras 29 e 30 apresentam os resultados obtidos no ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em um diagrama log-log de N versus $\Delta\sigma$ e N versus ϵ_i , respectivamente. Nesses diagramas também são apresentadas as linhas de tendência logarítmicas que foram ajustadas aos resultados (curvas de *Wöhler*), as quais representam o modelo de fadiga das misturas asfálticas. A partir das equações das linhas de tendência, obtiveram-se os parâmetros K_2 e n_2 e K_3 e n_3 apresentados no item 3.5.6, bem como seus R^2 , conforme apresentados na Tabela 14.

Figura 29 - Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões no centro do CP

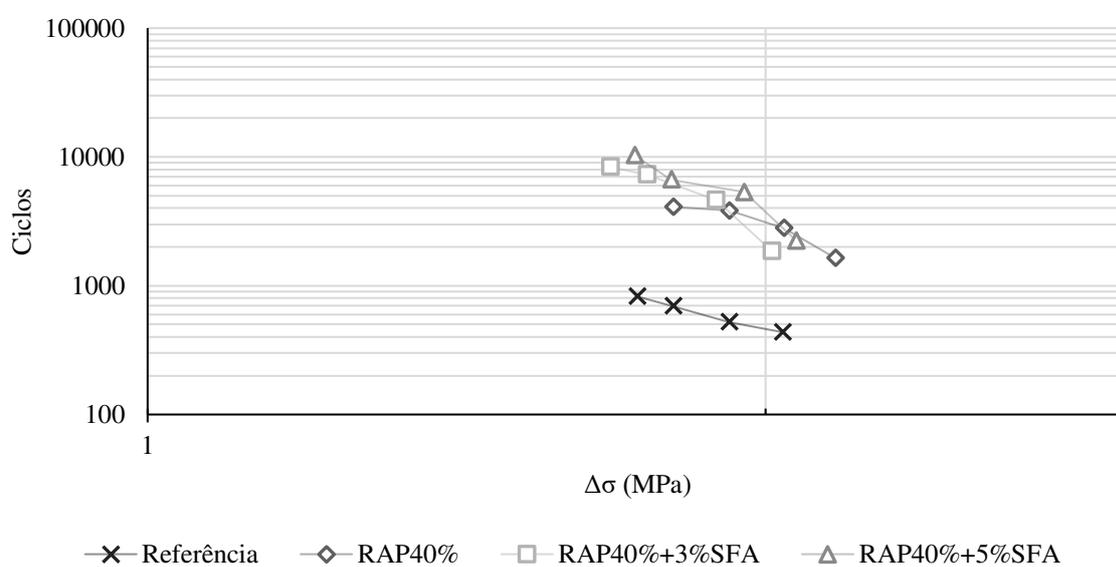


Figura 30 - Número de ciclos até a ruptura versus deformação resiliente inicial

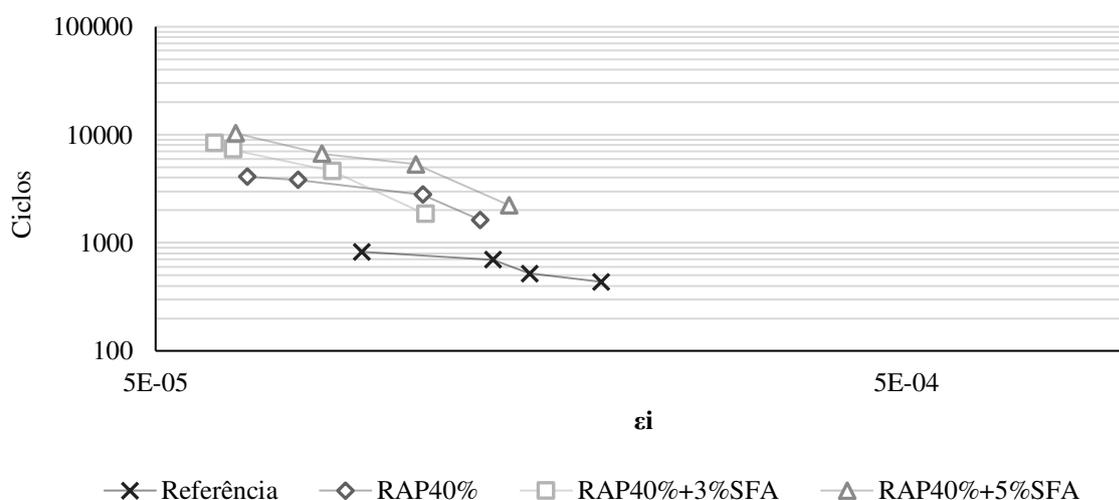


Tabela 14 - Resumo das características das curvas de vida de fadiga das misturas

Mistura asfáltica	Equação	R ²	Coeficientes	
Referência	$N \times \Delta\sigma$	0.9942	K₂	n₂
	$7267 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{3.986}$		7267	3.986
RAP40%	$N \times \varepsilon i$	0.8878	K₃	n₃
	$0.2437 \left(\frac{1}{\varepsilon i}\right)^{0.882}$		0.2437	0.882
RAP40%+3%SSFA	$N \times \Delta\sigma$	0.8525	K₂	n₂
	$87488 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{4.995}$		87488	0.8525
RAP40%+5%SSFA	$N \times \varepsilon i$	0.8992	K₃	n₃
	$0.0483 \left(\frac{1}{\varepsilon i}\right)^{1.187}$		0.0483	1.187
RAP40%+3%SSFA	$N \times \Delta\sigma$	0.9239	K₂	n₂
	$641251 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{8.116}$		641251	8.116
RAP40%+5%SSFA	$N \times \varepsilon i$	0.9749	K₃	n₃
	$3 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{\varepsilon i}\right)^{2.245}$		3×10^{-6}	2.245
RAP40%+3%SSFA	$N \times \Delta\sigma$	0.9304	K₂	n₂
	$627805 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{7.538}$		627805	7.538
RAP40%+5%SSFA	$N \times \varepsilon i$	0.9597	K₃	n₃
	$0.0006 \left(\frac{1}{\varepsilon i}\right)^{1.723}$		0.0006	1.723

Na Tabela 14 verifica-se que o modelo que explicou melhor a variabilidade dos dados de resposta ao redor de sua média, R² mais próximo de 1, foi o da mistura com 3% de ácido graxo da borra do óleo de soja (RAP40%+3%SSFA), seguido da mistura RAP40%+5%SSFA com valores bem próximos. A mistura RAP40% (sem agente rejuvenescedor) apresentou os menores valores de R², no entanto todas as misturas avaliadas apresentaram bons coeficientes de determinação. A norma DNIT183/2018 especifica um valor mínimo de R² igual a 0.80, e todas as amostras satisfizeram a especificação da norma.

O valor de n₂, que indica a inclinação das linhas na Figura 28 (N x Δσ), cresceu na sequência: RAP40%, Referência, RAP40%+3%SSFA e RAP40%+5%SSFA. Quanto maior o valor de n₂, maior a sensibilidade das misturas à variação de diferença de tensões.

No nível baixo de diferença de tensões, as misturas RAP40%+5%SSFA e RAP40%+3%SSFA apresentaram maior resistência à fadiga, e a alto nível de diferença de tensão as misturas RAP40% e RAP40%+5%SSFA apresentaram maior resistência à fadiga. De

acordo com o gráfico da Figura 29 se observa um comportamento parecido das misturas asfálticas recicladas, apresentando melhor desempenho à fadiga em relação à mistura asfáltica de referência. A adição do ácido graxo da borra do óleo de soja não acarretou diminuição de resistência à fadiga em níveis altos de diferença de tensão, mas melhorou o desempenho em baixo de nível de diferença de tensão da mistura asfáltica reciclada.

Santos (2005) aponta que misturas que possuem maior rigidez tendem a exibir, nos ensaios à tensão controlada, maior vida de fadiga. Essa afirmação corrobora com os resultados obtidos nesse estudo, tendo em vista que as misturas asfálticas recicladas apresentaram desempenho superior à mistura asfáltica de referência.

O valor de n_3 , que indica a inclinação das linhas na Figura 30 ($N \times \epsilon_i$), cresceu na sequência: Referência, RAP40%, Referência, RAP40%+5%SSFA e RAP40%+3%SSFA. Quanto maior o valor de n_3 , maior a sensibilidade das misturas à variação de deformação.

A deformação resiliente inicial da mistura é inversamente proporcional ao seu módulo de resiliência. Ao analisar esses resultados por trechos das curvas de *Wöhler*, conclui-se que, para deformações resilientes baixas, as misturas RAP40%+3%SSFA e RAP40%+5%SSFA apresentaram melhor desempenho, comportamento semelhante ao apresentado na Figura 28. No entanto, com o aumento das deformações resilientes, a mistura RAP40%+5%SSFA, seguida das misturas RAP40%+3%SSFA e RAP40%, tendem a suportar maior número de aplicações de carga (N).

Zhang *et al.* (2021c) analisaram misturas asfálticas recicladas com 40 e 60% de RAP com um agente rejuvenescedor composto (óleo aromático + plastificante + agente anti-defasagem, na proporção 100:10:2) em teores de 10 e 12% por peso de ligante asfáltico virgem. Os autores apontaram que a mistura asfáltica convencional apresentou maior resistência à fadiga, seguida das misturas asfálticas recicladas (40%RAP) rejuvenescidas com 10 e 12% de agente rejuvenescedor, e por último as misturas com 60% de RAP e 10 e 12% de agente rejuvenescedor.

A pesquisa de Wang *et al.* (2021) corrobora com os dados obtidos nessa pesquisa. Os autores investigaram misturas asfálticas recicladas com 40% de RAP modificadas pelo agente rejuvenescedor Sasobit a 0.3% e 0.2% por peso do ligante asfáltico. Os resultados apontaram a mistura asfáltica reciclada rejuvenescida com o maior teor de aditivo com o melhor desempenho à fadiga, seguida das misturas reciclada com 0.2% de agente rejuvenescedor e de referência com valores bem próximos.

Nessa pesquisa o comportamento do agente rejuvenescedor melhorar o desempenho à fadiga foi obtido, entretanto a mistura asfáltica reciclada sem o aditivo já apresentou resistência à fadiga superior à mistura de referência. Portanto, estudos com maiores teores de RAP e maior variação de teores do agente rejuvenescedor, com uma maior variação de níveis de tensões aplicadas, se faz necessário para uma análise mais aprofundada dos efeitos que o ácido graxo da borra do óleo de soja acarreta na vida de fadiga da mistura asfáltica reciclada.

4.3 ANÁLISE DE CIRCULARIDADE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Para calcular o fator de utilidade foram realizadas duas etapas experimentais: a primeira foi a realização do ensaio de resistência à deformação permanente, enquanto a segunda correspondeu à execução do ensaio de resistência à fadiga das misturas asfálticas. A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados e o fator de utilidade (X) para cada composição de mistura asfáltica reciclada.

Tabela 15 - Resultados obtidos para a resistência à fadiga e à deformação permanente para as misturas asfálticas desse estudo

Mistura	Referência	40% RAP	40% RAP + 3%SSFA	40% RAP + 5%SSFA
Fadiga (Ciclos)	826	4091	8316	10316
Deformação Permanente (Ciclos)	302	1990	1544	1464
Fator de Utilidade (X)	1	0.75	1.97	2.57

Após obtenção dos fatores de utilidade correspondentes para cada mistura asfáltica, a próxima etapa foi calcular os ICMs das misturas, por meio da metodologia desenvolvida pela Fundação Ellen MacArthur (2013) e adaptada por Mantalovas e Di Mino (2019). A Tabela 16 apresenta os dados das entradas e saídas para o cálculo dos ICMs.

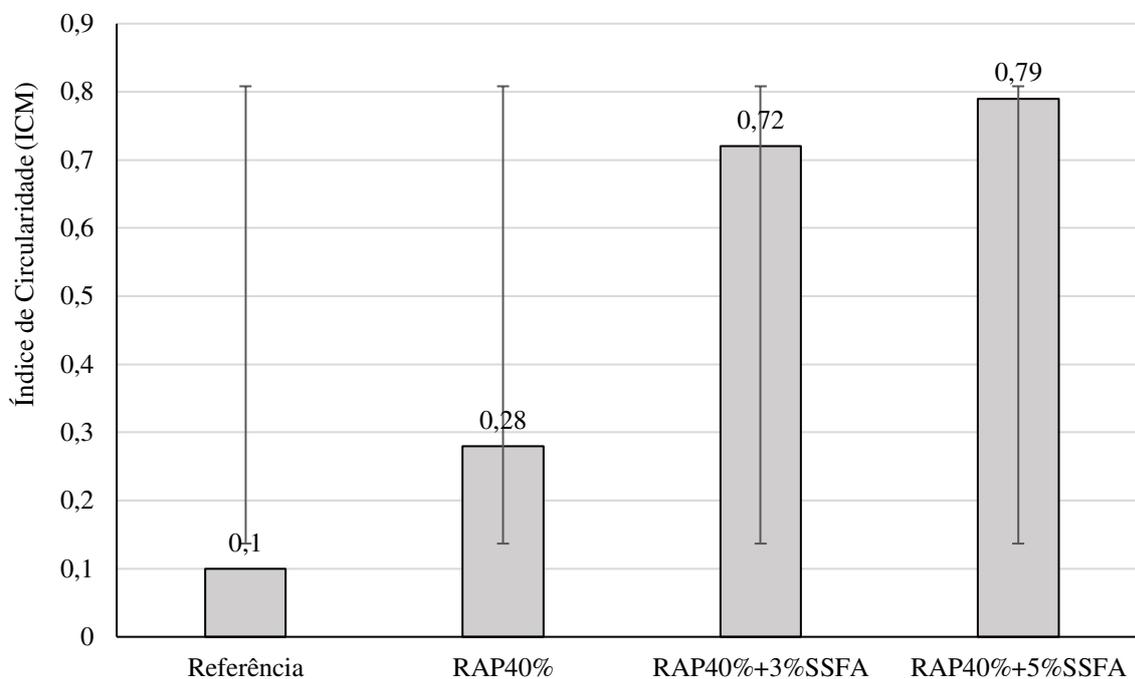
Tabela 16 - Entradas e saídas para quantificação do Índice de Circularidade do Material (ICM)

ICM das misturas asfálticas		Referência	40% RAP	40% RAP + 3% SSFA	40% RAP + 5% SSFA
Definição	Símbolo	Valor			
Massa de matéria-prima virgem usada	V (Kg)	1000.00	600.00	600.00	600.00
Fração de matéria-prima derivada de fontes recicladas	P_{RAP}	0.00	0.40	0.43	0.45
Massa do produto final	G_{MRAP}	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
Fração da massa do produto coletado por reciclagem no fim da vida	F_{RAP}	0.00	0.40	0.40	0.40
Quantidade de resíduos que vai para aterro ou recuperação de energia	W_{EOL} (Kg)	1000.00	600.00	600.00	600.00
Quantidade de resíduos gerados no processo de reciclagem	W_T (Kg)	0.00	0.00	0.00	0.00
Quantidade de resíduos gerados para produzir qualquer material reciclado contendo matéria-prima	W_P (Kg)	0.00	8.16	8.77	9.18
Eficiência do processo de reciclagem como tratamento	E_T	100%			
Eficiência do processo de reciclagem como produção	E_P	98%			
Quantidade total de resíduos irre recuperáveis	W (Kg)	1000.00	604.08	604.39	604.59
Índice de fluxo linear	LFI	1.00	0.60	0.60	0.60
Fator de utilidade das misturas asfálticas	X	1.00	0.75	1.97	2.57
Fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas	F(X)	0.90	1.20	0.46	0.35

O fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas $F(X)$ foi obtido por meio da divisão de 0.90 (valor padrão utilizado como fator de utilidade para as misturas asfálticas convencionais quando não se consegue obter dados de resistência à fadiga e à deformação permanente) (MANTALOVAS; DI MINO, 2020) pelo fator de utilidade das misturas asfálticas $[X]$, obtidos por meio dos ensaios de resistência à fadiga e à deformação permanente (*Flow Number*). Após os cálculos de todos os parâmetros necessários, determinou-

se o ICM das misturas asfálticas por meio da equação apresentada no fluxograma da Figura 18. A Figura 31 apresenta os valores de ICM para as misturas asfálticas analisadas nesse estudo.

Figura 31 - Resultados do ICM das misturas asfálticas



Os resultados obtidos de ICM estão diretamente relacionados com o desempenho mecânico das misturas asfálticas. O bom desempenho apresentado pelas misturas asfálticas recicladas quanto à deformação permanente e à fadiga acarretaram valores de fator de utilidade [X] superiores à mistura asfáltica de referência. Esse comportamento se deve ao teor de RAP utilizado nas composições não ser um teor tão elevado quando comparado a estudos com 60 e 90% de RAP (MANTALOVAS; DI MINO, 2020), não comprometendo o desempenho mecânico das misturas. Outro ponto a ser destacado foram os efeitos positivos que o ácido graxo da borra do óleo de soja acarretou à mistura asfáltica reciclada, como ganho de resistência à deformação permanente e à fadiga.

A mistura asfáltica de referência apresentou o menor índice de circularidade e a mistura asfáltica com 40% de RAP e 5% de ácido graxo da borra do óleo de soja, o maior ICM entre todas as misturas. Isso também indica o papel fundamental que o desempenho técnico de uma mistura asfáltica representa para sua circularidade.

A prática de reciclagem e incorporação de RAP em misturas asfálticas é ambientalmente sustentável, mas não pode ser caracterizada como circular em todos os casos e sob quaisquer circunstâncias, pois é importante que as implicações de sustentabilidade de uma ação

relacionada à Economia Circular sejam investigadas minuciosamente caso a caso. O teor e tipo de RAP, assim como o agente rejuvenescedor utilizado neste estudo acarretaram bom desempenho mecânico às misturas asfálticas e, conseqüentemente, bons índices de circularidade que viabilizam o uso desses materiais nas composições de misturas asfálticas.

4.4 ANÁLISE ECONÔMICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

4.4.1 DETERMINAÇÃO DOS INVESTIMENTOS

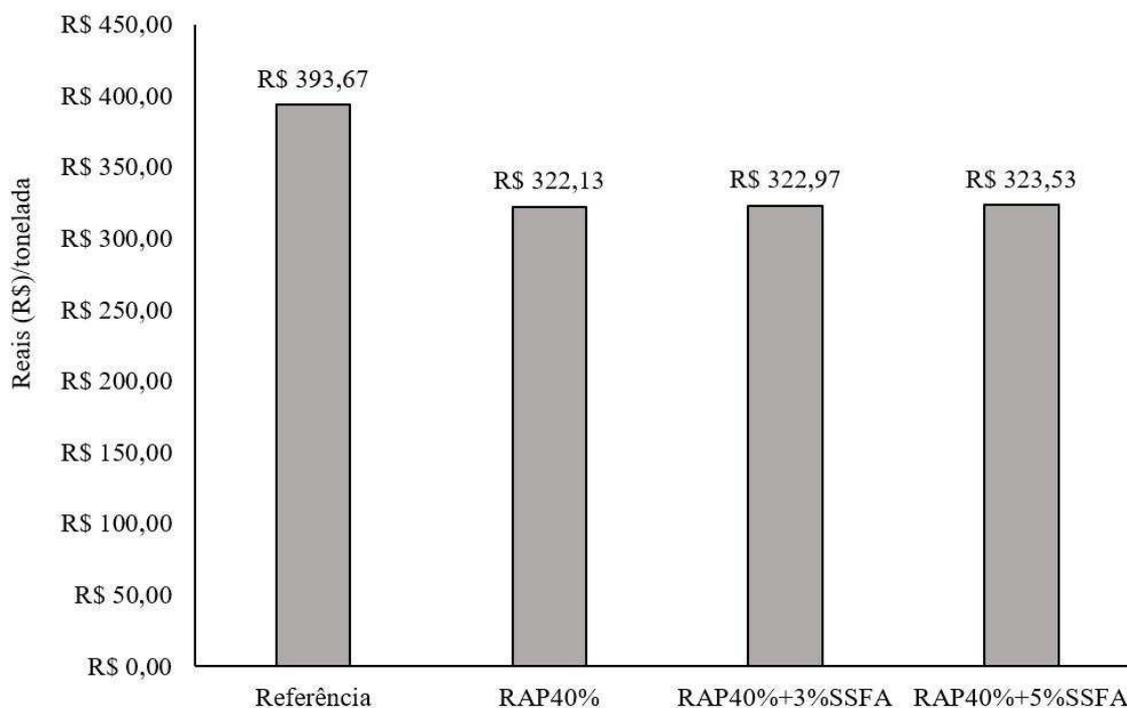
O Quadro 4 apresenta a composição de custo para a produção das misturas asfálticas, determinado a partir da composição unitária de custos definida no Quadro 3.

Quadro 4 – Composição de custo de produção das misturas asfálticas

MISTURA ASFÁLTICA CONVENCIONAL - 1T (1000Kg) - USINAGEM DE CONCRETO ASFÁLTICO COM CAP 50/70 PARA CAMADA DE ROLAMENTO, PADRÃO DNIT FAIXA C, EM USINA DE ASFALTO GRAVIMÉTRICA DE 150 TON/H. AF_03/2020_P												
Código / Seq.		Descrição					Unidade					
03.PAVLUSIN.006_01		USINAGEM DE CONCRETO ASFÁLTICO COM CAP 50/70 PARA CAMADA DE ROLAMENTO, PADRÃO DNIT FAIXA C, EM USINA DE ASFALTO GRAVIMÉTRICA DE 150 TON/H. AF_03/2020_P					T					
Código SIPC							Última Atualização: 05/2021					
101025												
Vigência: 03/2020												
COMPOSIÇÃO			Unid.	Ref.	RAP 40%	RAP40% +3%SSFA	RAP40% +5%SSFA	R\$	Custo Total R\$			
Item	Código	Descrição		Quant.	Quant.	Quant.	Quant.		Ref.	RAP 40%	RAP40% +3%SSFA	RAP40% +5%SSFA
Mão de Obra	88316	SERVENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	0,024	0,024	0,024	0,024	11,76	0,29	0,29	0,29	0,29
	90776	ENCARREGADO GERAL COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	0,012	0,012	0,012	0,012	16,92	0,21	0,21	0,21	0,21
Equipamento	100647	USINA DE ASFALTO, TIPO GRAVIMÉTRICA, PROD 150 TON/HORA - CHP DIURNO. AF_12/2019	CHP	0,01	0,01	0,01	0,01	8756,25	83,18	83,18	83,18	83,18
	100648	USINA DE ASFALTO, TIPO GRAVIMÉTRICA, PROD 150 TON/HORA - CHI DIURNO. AF_12/2019	CHI	0,003	0,003	0,003	0,003	8756,25	23,64	23,64	23,64	23,64
	5940	PÁ CARREGADEIRA SOBRE RODAS, POTÊNCIA LÍQUIDA 128 HP, CAPACIDADE DA CAÇAMBA 1,7 A 2,8 M³, PESO OPERACIONAL 11632 KG - CHP DIURNO. AF_06/2014	CHP	0,005	0,005	0,005	0,005	565	2,71	2,71	2,71	2,71
	5942	PÁ CARREGADEIRA SOBRE RODAS, POTÊNCIA LÍQUIDA 128 HP, CAPACIDADE DA CAÇAMBA 1,7 A 2,8 M³, PESO OPERACIONAL 11632 KG - CHI DIURNO. AF_06/2014	CHI	0,007	0,007	0,007	0,007	565	4,18	4,18	4,18	4,18
	7030	TANQUE DE ASFALTO ESTACIONÁRIO COM SERPENTINA, CAPACIDADE 30.000 L - CHP DIURNO. AF_06/2014	CHP	0,024	0,024	0,024	0,024	151,91	3,71	3,71	3,71	3,71
	95872	GRUPO GERADOR COM CARENAGEM, MOTOR DIESEL POTÊNCIA STANDART ENTRE 250 E 260 KVA - CHP DIURNO. AF_12/2016	CHP	0,01	0,01	0,01	0,01	190,3	1,81	1,81	1,81	1,81
	95873	GRUPO GERADOR COM CARENAGEM, MOTOR DIESEL POTÊNCIA STANDART ENTRE 250 E 260 KVA - CHI DIURNO. AF_12/2016	CHI	0,003	0,003	0,003	0,003	190,3	0,51	0,51	0,51	0,51
Transporte	93177	TRANSPORTE DE MATERIAL ASFÁLTICO, COM CAMINHÃO COM CAPACIDADE DE 20000 L EM RODOVIA PAVIMENTADA PARA DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE IGUAL OU INFERIOR A 100 KM. AF_02/2016	TxKM	2.375	1,75	1,75	1,75	1,84	4,37	3,22	3,22	3,22
	93590	TRANSPORTE COM CAMINHÃO BASCULANTE DE 10 M3, EM VIA URBANA PAVIMENTADA, DMT ACIMA DE 30KM (UNIDADE: M3XKM). AF_04/2016	M³xKM	18.801	19,131	19,131	19,131	0,82	15,42	15,69	15,69	15,69
Material	41899	CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO A GRANEL (CAP) 50/70 (COLETADO CAIXA NA ANP ACRESCIDO DE ICMS)	T	0,048	0,035	0,034	0,033	4700,53	223,28	164,52	159,58	156,29
	370	AREIA MÉDIA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)	M³	0,018	0,004	0,004	0,004	90	1,61	0,33	0,33	0,33
	4720	PÓ DE PEDRA - POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	M³	0,191	0,095	0,095	0,095	82,22	15,71	7,81	7,81	7,81
	4721	PEDRA BRITADA N. 1 (19 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	M³	0,052	0,052	0,052	0,052	87,04	4,51	4,56	4,56	4,56
	4721	PEDRA BRITADA N. 1 (12,5 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	M³	0,098	0,066	0,066	0,066	87,04	8,53	5,76	5,76	5,76
	1106	CAL HIDRATADA CH-I PARA ARGAMASSAS	M³	0,017	0,009	0,009	0,009	0,68	0,01	0,00	0,00	0,00
	-	MATERIAL FRESADO (RAP), SEM FRETE	M³	0	0,157	0,157	0,157	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	ÁCIDO GRAXO DA BORRA DO ÓLEO DE SOJA	T	0	0	0,001	0,002	5500,00	0,00	0,00	5,78	9,63	

O custo total de produção das misturas asfálticas tradicional e recicladas foi calculado pelo somatório da multiplicação da quantidade de cada insumo que compõe a mistura pelo custo unitário do insumo. A Figura 32 apresenta os investimentos necessários para a produção de 1t das misturas asfálticas consideradas.

Figura 32 - Custo de produção das misturas asfálticas analisadas



De acordo com os dados apresentados na Figura 31, observa-se que a mistura asfáltica reciclada sem aditivo (RAP40%) apresentou uma redução de custo de R\$ 71.54 (18.17%) em relação à mistura asfáltica de referência.

As misturas asfálticas recicladas com o ácido graxo apresentaram um pequeno aumento no custo em relação à mistura RAP40% da ordem de R\$ 0.84 e R\$ 1.40 para as misturas RAP40%+3%SSFA e RAP40%+5%SSFA, respectivamente. Entretanto, as misturas recicladas com o ácido graxo apresentaram, assim como a mistura reciclada sem aditivo, uma redução de custo considerável em relação à mistura de referência, sendo de R\$ 70.70 (17.96%) e R\$ 70.14 (17.81%) para as misturas RAP40%+3%SSFA e RAP40%+5%SSFA.

A substituição de agregados virgens por RAP reduziu o custo de produção das misturas asfálticas por reduzir o consumo de ligante asfáltico também. O quantitativo de ácido graxo da borra do óleo de soja não foi elevado para a produção de uma tonelada de mistura asfáltica

reciclada, sendo 1.05 kg e 1.75 kg para as misturas RAP40%+3%SSFA e RAP40%+5%SSFA, o que não acarretou aumento elevado de custo em relação à mistura reciclada sem aditivo.

A análise de custo de produção das misturas asfálticas permite inferir que a descoberta e uso de agentes rejuvenescedores residuais oriundos do processamento de óleos vegetais (óleo de soja) apresenta baixo custo e não interfere de forma considerável (ao utilizar baixos teores na modificação do ligante) no custo total da produção da mistura asfáltica reciclada.

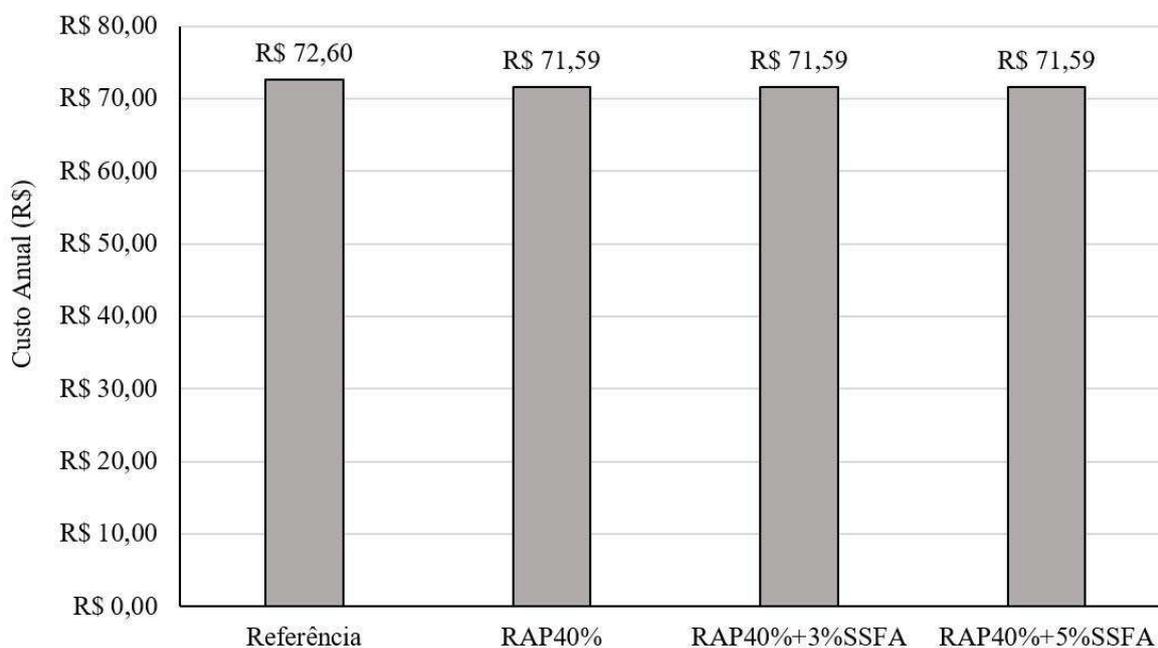
O uso de RAP permitiu uma redução de custo total na produção das misturas, o que incentiva maximizar seu uso e buscar materiais que viabilizem sua incorporação em maiores teores sem comprometer o desempenho técnico das misturas asfálticas.

Os custos de produção das misturas asfálticas podem variar em função da distância média de transporte, ou seja, a produção de misturas asfálticas recicladas a quente no local pode ser mais atrativa por reduzir ainda mais o custo total de produção devido à redução de custo com o transporte do RAP à usina.

4.4.2 DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS DE RECUPERAÇÃO

O custo total anual de recuperação referente a cada tipo de mistura foi calculado para um horizonte de 10 anos de vida útil da camada de rolamento. Para o cálculo do volume das misturas asfálticas realizou-se o somatório da divisão das massas dos materiais em kg pela densidade em kg/m³. A mistura asfáltica de referência correspondeu a 0.423518 m³, e as misturas RAP 40%, RAP 40% + 3%SSFA e RAP 40% + 5%SSFA a 0.417620 m³. A partir desses dados foram calculados os custos de recuperação para a mistura asfáltica de referência e para as misturas asfálticas recicladas. A Figura 33 apresenta os valores do custo anual de recuperação das misturas asfálticas.

Figura 33 – Custo anual de recuperação das misturas asfálticas



Conforme observado na Figura 32, o custo anual de recuperação da mistura asfáltica de referência foi superior às misturas asfálticas recicladas, apresentando uma diferença de custo de recuperação de R\$ 0,99 por tonelada de mistura asfáltica.

As misturas asfálticas recicladas apresentaram valores iguais, e os custos anuais das misturas asfálticas dos anos seguintes foram calculados reajustando ano a ano conforme o índice de reajuste de custos de manutenção e conservação (11.51%) em relação ao ano anterior (Quadro 5).

4.3.2.3 ANÁLISE ECONÔMICA

O Quadro 5 apresenta os resultados do fluxo de caixa das misturas asfálticas no horizonte de 10 anos de vida útil com taxa de desconto social de 8.5% e índice de reajuste de manutenção e conservação de 11.51%.

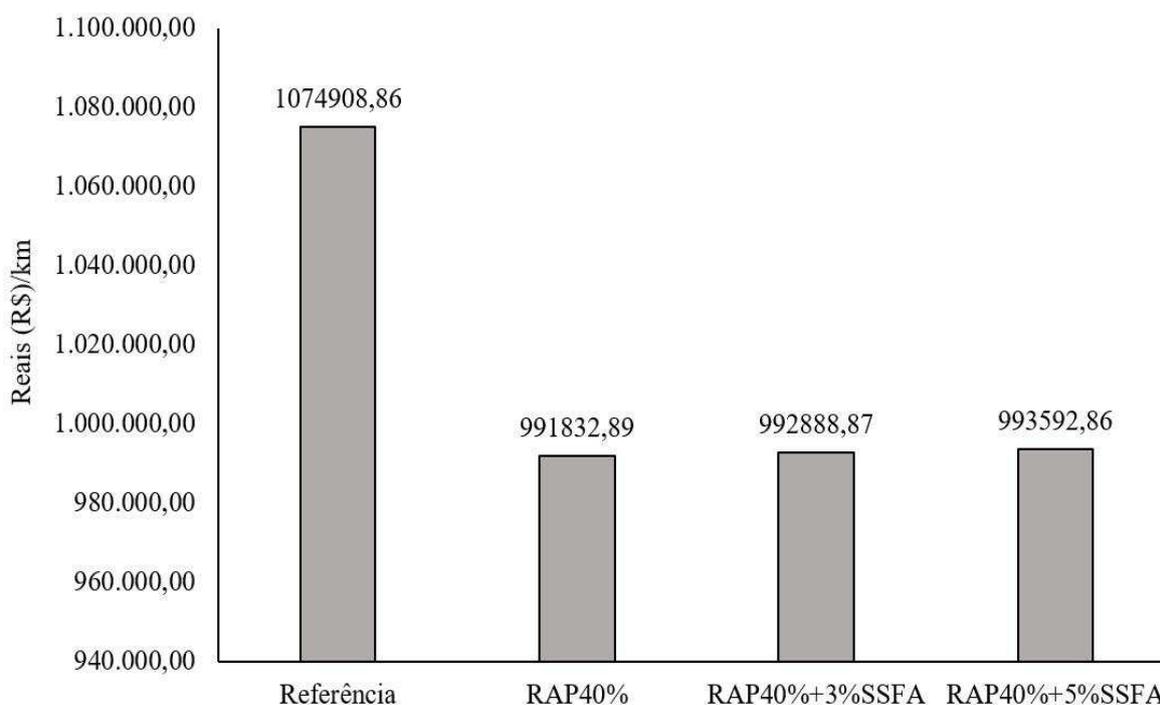
Quadro 5 – Fluxo de caixa das misturas asfálticas

1. MISTURA ASFÁLTICA DE REFERÊNCIA											
ITEM	Período (Anos)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Despesas de Capital											
Investimento (R\$)	-393,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custos de Recuperação (R\$)	0,00	-72,60	-72,48	-72,37	-72,25	-72,14	-72,02	-71,91	-71,79	-71,68	-71,56
Fluxo de Caixa (R\$)	-393,67	-72,60	-72,48	-72,37	-72,25	-72,14	-72,02	-71,91	-71,79	-71,68	-71,56
VPL (R\$)	-R\$ 867,13										
2. MISTURA ASFÁLTICA RAP40%											
ITEM	Período (Anos)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Despesas de Capital											
Investimento (R\$)	-322,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custos de Recuperação (R\$)	0,00	-71,59	-71,48	-71,36	-71,25	-71,13	-71,02	-70,90	-70,79	-70,67	-70,56
Fluxo de Caixa (R\$)	-322,13	-71,59	-71,48	-71,36	-71,25	-71,13	-71,02	-70,90	-70,79	-70,67	-70,56
VPL (R\$)	-R\$ 788,97										
3. MISTURA ASFÁLTICA RAP40%+3%SSFA											
ITEM	Período (Anos)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Despesas de Capital											
Investimento (R\$)	-322,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custos de Recuperação (R\$)	0,00	-71,59	-71,48	-71,36	-71,25	-71,13	-71,02	-70,90	-70,79	-70,67	-70,56
Fluxo de Caixa (R\$)	-322,97	-71,59	-71,48	-71,36	-71,25	-71,13	-71,02	-70,90	-70,79	-70,67	-70,56
VPL (R\$)	-R\$ 789,81										
4. MISTURA ASFÁLTICA RAP40%+5%SSFA											
ITEM	Período (Anos)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Despesas de Capital											
Investimento (R\$)	-323,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custos de Recuperação (R\$)	0,00	-71,59	-71,48	-71,36	-71,25	-71,13	-71,02	-70,90	-70,79	-70,67	-70,56
Fluxo de Caixa (R\$)	-323,53	-71,59	-71,48	-71,36	-71,25	-71,13	-71,02	-70,90	-70,79	-70,67	-70,56
VPL (R\$)	-R\$ 790,37										

O valor presente líquido do fluxo de caixa das misturas asfálticas recicladas no período de 10 anos foi inferior ao obtido para a mistura asfáltica de referência. As misturas asfálticas recicladas com e sem incorporação do ácido graxo da borra do óleo de soja apresentaram valores próximos, ou seja, a adição do ácido graxo à mistura asfáltica reciclada não influenciou de forma significativa no custo das misturas nos teores utilizados nesse estudo. O VPL das misturas RAP40% + 3%SSFA e RAP40% + 5%SSFA foram de 0.11% e 0.18% superiores em relação à mistura RAP40%, não apresentando aumento considerável.

A redução de custos das misturas asfálticas recicladas em relação à mistura asfáltica de referência foi de 9.01%, 8.92% e 8.85% para as misturas RAP40%, RAP40% + 3%SSFA e RAP40% + 5%SSFA, respectivamente. A Figura 34 apresenta os custos das misturas asfálticas para 1 km de rodovia.

Figura 34 - Custos das misturas asfálticas por km de rodovia



Esses valores se tornam consideráveis ao analisar o custo dessas misturas por km de rodovia. As misturas asfálticas RAP40%, RAP40%+3%SSFA e RAP40%+5%SSFA apresentaram redução de custo em relação à mistura de referência na ordem de 7.73%, 7.63% e 7.56%, respectivamente. Os valores das misturas recicladas foram próximos, apontando que a adição do SSFA não alterou de forma significativa os custos das misturas. A redução de custos das misturas asfálticas recicladas em relação à mistura de referência foi em torno de R\$ 82.000,00 por km de rodovia.

4.5 VIABILIDADE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Os dados obtidos nas análises mecânica, de circularidade e econômica permitiram analisar quais misturas asfálticas são mais viáveis para uso na camada de rolamento. O Quadro 6 apresenta a ordem de classificação por desempenho das misturas asfálticas em cada avaliação realizada nesse estudo.

Quadro 6 – Ordem de viabilidade das misturas asfálticas

Viabilidade Técnica		Viabilidade Ambiental		Viabilidade Econômica	
1º	RAP40%+5%SSFA	1º	RAP40%+5%SSFA	1º	RAP40%
2º	RAP40%+3%SSFA	2º	RAP40%+3%SSFA	2º	RAP40%+3%SSFA
3º	RAP40%	3º	RAP40%	3º	RAP40%+5%SSFA
4º	Referência	4º	Referência	4º	Referência

De acordo com o Quadro 6 as misturas asfálticas recicladas se apresentaram mais viáveis em todas as análises realizadas. A mistura com 5% de SSFA apresentou melhor desempenho mecânico e maior índice de circularidade. Entretanto, foi a mistura que apresentou maior custo entre as misturas asfálticas recicladas devido à adição do SSFA em maior teor. A mistura asfáltica reciclada com 3% de SSFA se manteve em 2º posição em todas as áreas avaliadas, o que a torna mais indicada para uso.

A mistura asfáltica de referência apresentou menor viabilidade entre todas as misturas analisadas, confirmando que a incorporação do RAP traz benefícios técnicos, ambientais e econômicos. Vale ressaltar que em termos de custos as misturas asfálticas recicladas, com e sem SSFA, apresentaram valores bem próximos. Portanto, a mistura RAP40%+5%SSFA pode ser uma boa escolha tendo em vista que apresentou melhor desempenho técnico e maior benefício ambiental.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

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

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados empíricos físicos e reológicos apontaram o efeito rejuvenescedor dos modificadores no ligante asfáltico, em destaque para o ácido graxo da borra do óleo de soja. A borra do óleo de soja apresentou alto teor de umidade, o que acabou influenciando nos resultados das amostras e colaborando para inviabilizar seu uso nas misturas asfálticas. Além disso, o ácido graxo da borra do óleo de soja conseguiu reduzir a temperatura máxima de PG do ligante asfáltico nos teores testados.

As misturas asfálticas recicladas apresentaram desempenho mecânico semelhante quanto à resistência à tração, dano por umidade induzida e módulo de resiliência. A adição do RAP à mistura asfáltica melhorou a resistência à deformação permanente e os resultados de módulo de dinâmico devido ao ganho de rigidez. À medida que se aumentou o teor de agente rejuvenescedor na mistura reciclada melhor foram os resultados de vida de fadiga.

Os dados obtidos de Índice de Circularidade do Material estão diretamente relacionados ao desempenho mecânico das misturas asfálticas. O desempenho satisfatório apresentado pelas misturas asfálticas recicladas quanto à deformação permanente e à fadiga acarretaram valores de fator de utilidade superiores à mistura asfáltica de referência. Desse modo, as misturas asfálticas recicladas apresentaram os maiores índices de circularidade, em destaque para a mistura RAP40%+5%SSFA.

A mistura asfáltica reciclada sem agente rejuvenescedor (RAP40%) apresentou o menor custo de produção por tonelada, seguida das misturas RAP40%+3%SSFA, RAP40%+5%SSFA e a mistura de referência. O valor presente líquido dessas misturas para uma vida útil de 10 anos apresentou o mesmo comportamento, ou seja, a incorporação do RAP proporcionou redução nos custos das misturas asfálticas. A incorporação do agente rejuvenescedor não acarretou aumento significativo de custos na mistura asfáltica reciclada.

De maneira geral, o ácido graxo da borra do óleo de soja (SSFA) se mostrou um bom agente rejuvenecedor, melhorando o comportamento da mistura asfáltica reciclada. As misturas asfálticas recicladas apresentaram melhor desempenho mecânico em todos os ensaios realizados em relação à mistura asfáltica de referência. Portanto, esse estudo permitiu apresentar um material sustentável, de baixo custo comercial e com potencial rejuvenecedor para misturas asfálticas recicladas. Além disso, as análises de desempenho técnico, ambiental e econômico puderam confirmar a viabilidade de uso dessas misturas asfálticas recicladas, em destaque para a mistura asfáltica reciclada com 3% de ácido graxo da borra do óleo de soja.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com a finalidade de aprofundar os resultados encontrados nessa pesquisa, propõe-se para trabalhos futuros:

- investigar a adição de maiores teores de borra do óleo de soja como modificador do ligante asfáltico a fim de atingir a redução de temperatura máxima de PG e permitir maiores teores de RAP;
- avaliar o desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas com a borra do óleo de soja;
- verificar a influência de maiores teores de ácido graxo da borra do óleo de soja em misturas asfálticas recicladas com maiores teores de RAP;
- analisar o uso de borras de outros óleos vegetais, assim como o ácido graxo de borras de outros óleos a fim de ampliar a gama de materiais disponíveis para uso como agente rejuvenecedor;
- realizar um estudo ambiental com as misturas asfálticas recicladas por meio de um indicador de circularidade e sustentabilidade ambiental;
- abordar um estudo de ciclo de vida contemplando os aspectos ambiental e econômico de misturas asfálticas recicladas com o ácido graxo da borra do óleo de soja.

REFERÊNCIAS

ABIOVE - Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais; 2022. Brasil - **Complexo Soja, Balanço de Oferta/Demanda (1.000 t)**. Disponível em:

<<https://abiove.org.br/estatisticas/>>. Acesso em: 19 de jan. de 2022.

AJWANI-RAMCHANDANI, R.; FIGUEIRA, S.; OLIVEIRA, R. T.; JHA, S. Enhancing the circular and modified linear economy: The importance of blockchain for developing economies. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 168, 2021.

AKHTAR, A.; SARMAH, A.K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262-281, 2018.

AKSOY, A.; ISKENDER, E. Creep in conventional and modified asphalt mixtures. **Proceedings of Institution of Civil Engineers**, v. 161, p. 185-195, 2008.

ALI, Y.; IRFAN, M.; AHMED, S.; KHANZADA, S.; MAHMOOD, T. Investigation of factors affecting dynamic modulus and phase angle of various asphalt concrete mixtures. **Materials and Structures**, v. 49, p. 857-868, 2016.

ALONSO, A.; TEJEDA, E.; MORENO, F.; RUBIO, M.C.; MEDEL, E. A comparative study of natural zeolite and synthetic zeolite as an additive in warm asphalt mixes. **Materiales de Construcción**, v. 63, p. 195-217, 2013.

AL-QADI, I. L.; AURANGZED, Q.; CARPENTER, S. H.; PINE, W. J.; TREPANIER, J. **Impact of high RAP contents on structural and performance properties of asphalt mixtures**. Civil Engineering Studies, Illinois Center for Transportation Series, 2012.

AL-SAFAR, Z. H.; YAACOB, H.; SATAR, M. K. I. M.; SALEEM, M. K.; LAI, J. C.; JAYA, R. P. A review on rejuvenating materials used with reclaimed hot mix asphalt. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 48, n. 3, 2020.

AMELI, A.; BABAGOLI, R.; KHABOOSHANI, M.; ALIASGARI, R.; JALALI, F. Permanent deformation performance of binders and stone mastic asphalt mixtures modified by SBS/montmorillonite nanocomposite. **Construction and Building Materials**, v. 239, 2020.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 319-15**: Standard Method of Test for Quantitative Extraction and Recovery of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures. Washington, 2019.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 240**: Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). Washington, 2021.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO R 28-12**: Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). Washington, 2016.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 283**: Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. Washington, 2014.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. **AASHTO M 320**: Standard specification for performance-graded asphalt binder. Washington, 2017.

AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY. **AOCS Ca 2c-25**: Moisture and Volatile Matter, in Animal and Vegetable Fats, Air Oven Method. Estados Unidos, 2017.

AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY. **AOCS Ca 5a-40**: Free Fatty Acids in Crude and Refined Fats and Oils. Estados Unidos, 1997.

AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY. **AOCS Ca 6a-40**: Unsaponifiable Matter in Fats and Oils, Except Marine Oils. Estados Unidos, 2017.

AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY. **AOCS G 3-53**: Total Fatty Acids, Oxidized Fatty Acids, Wet Extraction Method. Estados Unidos, 2017.

AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY. **AOCS G 5-40**: Neutral Oil in Soapstock, Unsaponifiable Material. Estados Unidos, 2017.

AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY. **AOCS G 7-56**: pH of Acidulated Soapstocks. Estados Unidos, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1252**: Standard Test Methods 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 127**: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. Estados Unidos, 2015.

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 C 136M**: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Estados Unidos, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 496M**: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Estados Unidos, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2172**: Standard Test Methods 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 2872**: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). Estados Unidos, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 36M-14**: Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). Estados Unidos, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4402M**: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. Estados Unidos, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 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 4867M-09**: Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures. Estados Unidos, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5100**: Standard Test Method for Adhesion of Mineral Aggregate to Hot Bitumen. Estados Unidos, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5821-13**: Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. Estados Unidos, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5M**: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. Estados Unidos, 2020.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 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.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 7369**: Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Asphalt Mixtures by Indirect Tension Test. Estados Unidos, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 7405**: Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. Estados Unidos, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 7653**: Standard Test Method for Determination of Trace Gaseous Contaminants in Hydrogen Fuel by Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy. Estados Unidos, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 8292**: Standard Test Method for Permanent Deformation Behavior and Rutting Resistance of Compacted Asphalt Mix in the Modified Loaded Wheel Tracker Test Utilizing Controlled Confining Pressure. Estados Unidos, 2020.

ANTHONISSEN, J.; BERGH, W.V.D.; BRAET, J. Review and environmental impact assessment of green technologies for base courses in bituminous pavements. **Environmental Impact Assessment**, v. 60, p. 139-147, 2016.

ANTHONISSEN, J.; VAN DEN BERGH, W.; BRAET, J. Reuse of bituminous pavements: A mini-review of research, regulations and modelling. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 4, p. 357-366, 2017.

ARÁMBULA-MERCADO, E.; KASEER, F.; MARTIN, A.E.; YIN, F.; CUCALON, L.G. Evaluation of recycling agent dosage selection and incorporation methods for asphalt

mixtures with high RAP and RAS contents. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 432-442, 2018.

ARAÚJO, A. M. **Borra de óleo de soja: caracterização físico-química e avaliação da potencialidade econômica**. Monografia (Engenharia de Petróleo). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

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

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

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

BARROS, A. G. **O efeito do uso de agentes rejuvenescedores encapsulados sobre a autorregeneração de misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.

BATOULI, M.; BIENVENU, M.; MOSTAFAVI, A. Putting sustainability theory into roadway design practice: Implementation of LCA and LCCA analysis for pavement type selection in real-world decision making. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 52, p. 289-302, 2017.

BEHNOOD, A. Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 231, p. 171–182, 2019.

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

BOCK, A. L. **Desempenho à fadiga de misturas em concreto asfáltico com diferentes formas de incorporação de cal**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2009.

BROWN, E. R.; MURPHY, N.; YU, L.; MAGER, S. **Historical Development of Asphalt Content Determination by the Ignition Method**. NCAT Report 95-02. 28 p. National Center for Asphalt Technology. Alabama Department of Transportation, Auburn, AL, 1995.

BROWN, R.B.; KANDHAL, P.S.; ROBERTS, F.L.; KIM, Y.R.; LEE, D.; KENNEDY, T.W. **Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction**. NAPA Research and Education Foundation, Lanham, Maryland, USA, 2009.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Cadernos técnicos de composições para usinagem**, 2021.

CANAKCI, M.; SANLI, H. Biodiesel production from various feedstocks and their effects on the fuel properties. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, v. 35, p. 431–441, 2008.

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

CELAURO, C.; CORRIERE, F.; GUERRIERI, M.; LO CASTO, B. Environmentally appraising different pavement and construction scenarios: A comparative analysis for a typical local road. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 34, p. 41-51, 2015.

CHEN, H.; BAHIA, H.U. Modelling effects of aging on asphalt binder fatigue using complex modulus and the las test. **International Journal of Fatigue**, v. 146, 2021.

CHEN, T.; LUAN, Y.; MA, T.; ZHU, J.; HUANG, X.; MA, S. Mechanical and microstructural characteristics of different interfaces in cold recycled mixture containing cement and asphalt emulsion. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, 2020.

CHEN, Y.; CHEN, Z.; XIANG, Q.; QIN, W.; YI, J. Research on the influence of RAP and aged asphalt on the performance of plant-mixed hot recycled asphalt mixture and blended asphalt. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, e00722, 2021.

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

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

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Ministério do Meio Ambiente.
Resolução n° 307, 05 de julho de 2002, 2002.

COOPER, S.B., MOHAMMAD, L.N., ELSEIFI, M.A. Laboratory performance of asphalt mixtures containing recycled asphalt shingles, reclaimed asphalt pavement, and recycling agents. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n.3, p. 1-8, 2017.

COPELAND, A. **Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice, Report No. FHWA-HRT-11-021**. Federal Highway Administration, Washington, D.C., 2011.

COSTA, R. M.; SÁNCHEZ, L.E. Avaliação do desempenho ambiental de obras de recuperação de rodovias. **Revista Escola de Minas**, v. 63, n. 2, p. 247-254, 2010.

CRUZ, R. M. M. **Avaliação da extracção e recuperação de betumes modificados com polímeros em misturas betuminosas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Lisboa, Lisboa, 2017.

CUADRI, A. A.; ROMAN, C.; GARCÍA-MORALES, M.; GUIADO, F.; MORENO, E.; PARTAL, P. Formulation and processing of recycled-low-density-polyethylene-modified bitumen emulsions for reduced-temperature asphalt technologies. **Chemical Engineering Science**, v. 156, p. 197–205, 2016.

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

D'ANGELO, J.; HARM, E.; BARTOSZEK, J.; BAUMGARDNER, G.; CORRIGAN, M.; COWSERT, J.; HARMAN, T.; JAMSHIDI, M.; JONES, W.; NEWCOMB, D.; PROWELL,

B.; SINES, R.; YEATON, B. **Warm-mix asphalt: European practice. International Technology Scanning Program.** Virginia: Federal Highway Administration, 2008.

DEEF-ALLAH, E.; ABDELRAHMAN, M. Balancing the performance of asphalt binder modified by tire rubber and used motor oil. **International Journal of Recent Technology and Engineering**, v. 8, n. 4, p. 5501-5508, 2019.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 095-EM:** Cimentos asfálticos de petróleo - 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, 2011.

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 184**: Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 416**: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **Boletim Administrativo - Edição Nº 178**. Brasília, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **Manual de Custos Médios Gerenciais**. Manual de Metodologia, v. 1, 2019.

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

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

DING, X.; CHEN, L.; MA, T.; MA, H.; GU, L.; CHEN, T.; MA, Y. Laboratory investigation of the recycled asphalt concrete with stable crumb rubber asphalt binder. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 552-557, 2019.

DOKANDARI, P. A.; KAYA, D.; SENGOZ, B.; TOPAL, A. **Implementing waste oils with reclaimed asphalt pavement**. In: Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'17), p. 2371–5294, 2017.

ELGHALI, L.; COWELL, S.J.; BEGG, K.G.; CLIFT, R. Support for sustainable development policy decisions a case study from highway maintenance. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11, n. 11, p. 29-39, 2005.

ELKASHEF, M.; WILLIAMS, R. C. Improving fatigue and low temperature performance of 100% RAP mixtures using a soybean-derived rejuvenator. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 345-352, 2017.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the Circular Economy**. Ellen MacArthur Foundation: Cowes, UK; v. 1, p. 1–96, 2013.

EL-SHORBAGY, A. M.; EL-BADAWY, S. M.; GABR, A. R. Investigation of waste oils as rejuvenators of aged bitumen for sustainable pavement. **Construction and Building Materials**, v. 220, p. 228-237, 2019.

EPPS MARTIN, A.; KASEER, F.; ARÁMBULA-MERCADO, E.; BAJAJ, A.; SIAS, J. E.; HAJJ, E. Y.; MORIAN, N.; OGBO, C.; CECCOVILLI, R. Component materials selection guidelines and evaluation tools for binder blends and mixtures with high recycled materials content and recycling agents. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 88, 2019.

EUROPEAN COMMISSION. **Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions** —The European Green Deal; European Commission: Brussels, Belgium, 2019.

FAN, Y. **Effect of tung oil and tung oil prepolymer on pavement performance of asphalt**, Architectural and Civil Engineering of Hunan University, Hunan University, Hunan University, 2019.

FAXINA, A.L. **Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction**. Washington: FHWA, 2016.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Warm Mix Asphalt: European Practice**. Washington: FHWA, 2008.

FERNANDES, J. I. M.; FREITAG, A.; ROCHADELLI, R.; BURIN, A. M.; CORDEIRO, C. P. Soybean oil replaced by acidulated soapstock in broiler diets. **Archives of Veterinary Science**, v. 7, n. 2, p. 135-141, 2002.

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

FLORES, G.; GALLEGO, J.; MIRANDA, L.; MARCOBAL, J. R. Cold asphalt mix with emulsion and 100% rap: Compaction energy and influence of emulsion and cement content. **Construction and Building Materials**, v. 250, 2020.

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

FORTON, A.; MANGIAFICO, S.; SAUZÉAT, C.; DI BENEDETTO, H.; MARC, P. Properties of blends of fresh and RAP binders with rejuvenator: Experimental and estimated results. **Construction and Building Materials**, v. 236, 117555, 2020.

FRANCO, G. **Tabela de composição química dos alimentos**. 9 ed. São Paulo: Atheneu, 2012.

FRODERMANN, L. **Exploratory Study on Circular Economy Approaches: a Comparative Analysis of Theory and Practice**. Springer Fachmedien Wiesbaden: Wiesbaden, Germany, 2018.

FROSCH, R.A.; GALLOPOULOS, N.E. Strategies for Manufacturing. **Scientific American**, v. 261, p. 144–152, 1989.

FURTADO, N.; KAWAMOTO, E. **Avaliação de Projetos de Transporte**. 1a edição. São Carlos: EESC, 2002.

G. LIU; NIELSEN, E.; KOMACKA, J.; LEEGWATER, G.; VAN DE VEN, M. Influence of soft bitumens on the chemical and rheological properties of reclaimed polymer-modified

binders from the “old” surface-layer asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 79, p. 129-135, 2015.

GAIOTTO, J. B.; MENTEN, J. F. M.; RACANICCI, A. M. C.; LAFIGLIOLA, M. C. Óleo de soja, óleo ácido de soja e sebo bovino como fontes de gordura em rações de frangos de corte. **Revista Brasileira de Ciência Avícola**, v. 2, n. 3, p. 219-227, 2000.

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

GARBA, R. **Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures**. (Ph.D. dissertation). Department of Road and Railway Engineering Norwegian University of Science and Technology NTNU, 2002.

GARCIA, A.; SALIH, S.; GÓMEZ-MEIJIDE, B. Optimum moment to heal cracks in asphalt roads by means electromagnetic induction. **Construction and Building Materials**, v. 238, 2020.

GARCÍA, A.; SCHLANGEN, E.; VAN DE VEN, M. Properties of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. **Fuel**, v. 90, n. 2, p. 583-591, 2011.

GEISENDORF, S.; PIETRULLA, F. The circular economy and circular economy concepts: a literature analysis and redefinition. **Thunderbird International Business Review**, v. 60, n. 5, p. 771-782, 2019.

GENG, Y.; FU, J.; SARKIS, J.; XUE, B. Towards a national circular economy indicator system in China: An evaluation and critical analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 23, p. 216–224, 2012.

GIANI, M. I.; DOTELLI, G.; BRANDINI, N.; ZAMPORI, L. Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 104, p. 224–238, 2015.

GIRIMATH, S., SINGH, D. Effects of bio-oil on performance characteristics of base and recycled asphalt pavement binders. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116684, 2019.

GOLI, H.; LATIFI, M. Evaluation of the effect of moisture on behavior of warm mix asphalt (WMA) mixtures containing recycled asphalt pavement (RAP). **Construction and Building Materials**, v. 247, 2020.

GOMES, P. R.; MALHEIROS, T.F. Proposta de análise de indicadores ambientais para apoio na discussão da sustentabilidade. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 8, n. 2, p. 151-169, 2012.

GONÇALVES, B. C. S.; PEREIRA, D. S.; SPECHT, L. P.; PINHEIRO, R. J. B. Avaliação da centrífuga rotarex na determinação do teor de ligante e granulometria de diferentes concretos asfálticos. **Revista Transportes**, v. 28, n. 3, p. 75-90, 2019.

GRAEDEL, T.E.; ALLENBY, B.R. **Industrial Ecology and Sustainable Engineering**: International edition Prentice Hall, Upper Saddle River, 2010.

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

GUGGENBERGER, L. F.; ROTONDARO, A. **Por uma economia circular na indústria da construção civil**. 2021.

GUNGAT, L.; HAMZAH, M. O.; YUSOFF, N. I. M.; GOH, S. W. Design and properties of high reclaimed asphalt pavement with RH-WMA. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 512, 2019.

WEN, H.; BHUSAL, S.; WEN, B. Laboratory evaluation of waste cooking oil-based bioasphalt as an alternative binder for hot mix asphalt. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 10, p. 1432-1437, 2013.

HAJJ, E. Y.; SOULIMAN, M. I.; ALAVI, M. Z.; SALAZAR, L. G. L. Influence of hydrogreen bioasphalt on viscoelastic properties of reclaimed asphalt mixtures. **Transportation Research Record**, v. 2371, n. 1, p. 13-22, 2013.

HARVEY, J.; KENDALL, A.; LEE, I. S.; SANTERO, N.; VAN DAM, T.; WANG, T. **Pavement Life Cycle Assessment Workshop: Discussion Summary and Guidelines**. Pavement Research Center Technical Memorandum, University of California, 2010.

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

HINTZ, C.; BAHIA, H. Understanding mechanisms leading to asphalt binder fatigue in the dynamic shear rheometer. **Road Materials and Pavement Design**, v. 14, p. 231-251, 2013.

HORVATH, A. **Life-cycle Environmental and Economic Assessment of Using Recycled Materials for Asphalt Pavements**. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, 2003.

HUANG, B.; SHU, X.; VUKOSAVLJEVIC, D. Laboratory Investigation of Cracking Resistance of Hot-Mix Asphalt Field Mixtures Containing Screened Reclaimed Asphalt Pavement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 11, p. 1535-1543, 2011.

IMANINASAB, R.; BAKHSHI, B. Rutting analysis of modified asphalt concrete pavements. **Proceedings of Institution of Civil Engineers**, v. 170, p. 166-177, 2015.

J.M. Benyus **Biomimicry: Innovation Inspired by Nature**. Harper-Collins, 1997.

JAHANBAKHSI, H.; KARIMI, M.M.; NASERI, H.; NEJAD, F.M. Sustainable asphalt concrete containing high reclaimed asphalt pavements and recycling agents: performance assessment, cost analysis, and environmental impact. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, 118837, 2020.

JALKH, R.; EL-RASSY, H.; CHEHAB, G. R.; ABIAD, M. G. Assessment of the physico-chemical properties of waste cooking oil and spent coffee grounds oil for potential use as asphalt binder rejuvenators. **Waste and Biomass Valorization**, v. 9, n. 11, p. 2125-2132, 2018.

JESUS, F. G. **Indicadores de desempenho para a gestão ambiental dos serviços de manutenção rodoviária**. Dissertação (Mestrado - Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento). Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, 2015.

JI, J.; YAO, H.; SUO, Z.; YOU, Z.; LI, H.; XU, S.; SUN, L. Effectiveness of vegetable oils as rejuvenators for aged asphalt binders. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 3, 2017.

JIMENEZ DEL BARCO-CARRION, A.; LO PRESTI, D.; POUGET, S.; AIREY, G. D.; CHAILLEUX, E. Linear viscoelastic properties of high reclaimed asphalt content mixes with bio-binders. **Road Materials and Pavement Design**, v. 18, p. 1-11, 2017.

JOHN, V. M. **Categoria 4: Conservação de Recursos Materiais**. In JOHN, V. M.; PRADO, R.T. A. (Coord.) Boas práticas para habitação mais sustentável. 1 ed. São Paulo: Páginas & Letras - Editora Gráficas, 2010.

JOHN, V. M. **Categoria 4: Conservação de Recursos Materiais**. In: Boas práticas para habitação mais sustentável. 1 ed. São Paulo: Páginas & Letras - Editora Gráficas, 2010.

KANAZAWA, N. Public investment multipliers: Evidence from stock returns of the road pavement industry in Japan. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 133, 2021.

KARLSSON, R.; ISACSSON, U. Material-related aspects of asphalt recycling – state of – the art. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 18, n. 1, 2006.

KASEER, F.; EPPS MARTIN, A.; ARÁMBULA-MERCADO, E. Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States: A literature review. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 974-987, 2019.

KAWAMOTO, Eiji. **Análise de sistemas de transportes**. 2a. edição. São Carlos: EESC, 1994.

KENNEDY, H. T. **Global vegetable oil production set to reach new record highs in 2021/22. The Digest, 2021**. Disponível em:

<https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/11/20/global-vegetable-oil-production-set-to-reach-new-record-highs-in-2021-22/>. Acesso em: 19 de jan. de 2022.

KORHONEN, J.; WIHERSAARI, M.; SAVOLAINEN, I. Industrial ecosystem in the Finnish forest industry: Using the material and energy flow model of a forest ecosystem in a forest industry system. **Ecological Economics**, v. 39, p. 145–161, 2001.

KOVACIC, I.; WALTENBERGER, L.; GOURLIS, G. Tool for life cycle analysis of facade-systems for industrial buildings. **Journal of Cleaner Production**, v. 130, p. 260-272, 2016.

KROL, J.B.; KOWALSKI, K.J.; NICZKE, L.; RADZISZEWSKI, P. Effect of bitumen fluxing using a bio-origin additive. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 194-203, 2016.

KUEHL, R.; KORZILIUS, J.; MARTI, M. **Synopsis of recycled asphalt pavement (RAP) material**. Minnesota Department of Transportation, 2016.

LAGOS-VARAS, M.; MOVILLAQUESADA, D.; RAPOSEIRAS, A. C.; ARENAS, J. P.; CALZADA-PÉREZ, M. A.; VEGA-ZAMANILLO, A.; LASTRA-GONZÁLEZ, P. Influence of limestone filler on the rheological properties of bituminous mastics through susceptibility master curves. **Construction and Building Materials**, v. 231, 2020.

LASTRA-GONZÁLEZ, P.; INDACOECHEA-VEGA, I.; CALZADA-PÉREZ, M.A.; VEGA-ZAMANILLO, Á.; CASTRO-FRESNO, D. Assessment of induction heating in the performance of porous asphalt mixtures. **Road Materials and Pavement Design**, v. 21, n. 8, p. 2302-2320, 2020.

LEAHY, R. B. **Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Concrete**. (Ph.D. dissertation). University of Maryland, College Park, MD, 1989.

LEI, Z.; BAHIA, H.; YI-QIU, T.; LING, C. Effect of refined waste and bio-based oil modifiers on rheological properties of asphalt binders. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 504-511, 2017.

LESUEUR, D. The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 145 (1–2), p. 42-82, 2009.

LI, H.; ZHANG, F.; FENG, Z.; LI, W.; ZOU, X. Study on waste engine oil and waste cooking oil on performance improvement of aged asphalt and application in reclaimed asphalt mixture. **Construction and Building Materials**, v. 276, 2021.

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

LINDER, M.; SARASINI, S.; VAN LOON, P. A Metric for Quantifying Product-Level Circularity. **Journal Industrial Ecology**, v. 21, p. 545–558, 2017.

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

LIU, K.; FU, C.; XU, P.; LI, S.; HUANG, M. An eco-friendliness inductive asphalt mixture comprising waste steel shavings and waste ferrites. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, 2021.

LIU, K.; XU, P.; WANG, F.; JIN, C.; LIU, Q.; PANG, H.; XIE, H. The accumulated stress damage and residual life prediction of unreinforced concrete pavement with electric heating pipes. **Construction and Building Materials**, v. 278, 122258, 2021.

LOISE, V.; CAPUTO, P.; PORTO, M.; CALANDRA, P.; ANGELICO, R.; ROSSI, C. O. A review on Bitumen Rejuvenation: Mechanisms, materials, methods and perspectives. **Applied Sciences**, v. 9, n. 20, 2019.

LU, H. W.; ZHANG, H. C.; SUN, L. J. Permanent deformation analysis of asphalt mixture under moisture-loading coupled action. **Journal of Building Materials and Structures**, v. 15, n. 6, p. 788-792, 2012.

LU, X.; ISACSSON, I. Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology. **Construction and Building Materials**, v. 16, n. 1, p. 15-22, 2012.

LUCENA, L.C.F.L., SILVEIRA, I.V., COSTA, D.B. Avaliação de ligantes asfálticos modificados com óleo da Moringa Oleífera Lam para uso em misturas mornas. **Revista Matéria**, v. 21 n. 1, p. 72-82, 2016.

LYLE, J.T. **Regenerative Design for Sustainable Development**. Hoboken, NJ, 1996.

MA, T.; HUANG, X.; ZHAO, Y.; ZHANG, Y. Evaluation of the diffusion and distribution of the rejuvenator for hot asphalt recycling. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 530-536, 2015.

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

MAMUN, A.; ARIFUZZAMAN, M.; TAHA, R.: **Nano scale aging characterization of carbon nanotube modified asphalt binders**. In: Advances in Materials and Pavement Prediction: Papers from the International Conference on Advances in Materials and Pavement Performance Prediction, Doha, Qatar, p. 403, 2018.

MANDARINO, J. M. G.; HIRAKURI, M. H.; ROESSING, A. C. **Tecnologia para produção do óleo de soja: descrição das etapas, equipamentos, produtos e subprodutos**. Londrina: EMBRAPA SOJA, 2015.

MANTALOVAS, K.; DI MINO, G. Integrating Circularity in the Sustainability Assessment of Asphalt Mixtures. **Sustainability**, v. 12, 2020.

MARIA, A.; EYCKMANS, J.; VAN ACKER, K. Use of LCA and LCC to help decision-making between downcycling versus recycling of construction and demolition waste. **Advances In Construction and Demolition Waste Recycling**, p. 537-558, 2020.

MAZZONI, G.; BOCCI, E.; CANESTRARI, F. Influence of rejuvenators on bitumen ageing in hot recycled asphalt mixtures. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, v. 5, n. 3, p. 157-168, 2018.

MCDANIEL, R.; MICHAEL ANDERSON, R. **NCHRP REPORT 452: Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual** Transportation, 2001.

MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. **Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things**. North Point Press, 2010.

MCLAREN, D.; J. NISKANEN, J.; ANSHELM, J. Reconfiguring repair: Contested politics and values of repair challenge instrumental discourses found in circular economies literature. **Resources, Conservation and Recycling**. V. 8, 2020.

MELO NETO, O. M.; MENDONÇA, A. M. G. D.; RODRIGUES, J. K. G.; LIMA, R. K. B.; SILVANI, C.; SILVA, I. M. Rheological study of asphalt binder modified by cotton and copaiba oils. **Revista Cubana de Ingeniería**, v. 13, e315, 2022.

MELO NETO, O. M.; SILVA, G. C. B.; LUCENA, L. C. F. L. **Utilização de material fresado em misturas asfálticas: uma revisão integrativa**. In: V CONAPESC, Campina Grande, 2020.

MIAH, J.H.; KOH, S.C.L.; STONE, D. A hybridised framework combining integrated methods for environmental Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing. **Journal Of Cleaner Production**, v. 168, p. 846-866, 2017.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA. **Economia divulga nota técnica sobre a Taxa Social de Desconto para infraestrutura**. Disponível em: < <https://www.gov.br/economia/pt-br/assuntos/noticias/2020/maio/economia-divulga-nota-tecnica-sobre-a-taxa-social-de-desconto-para-infraestrutura#:~:text=Assim%2C%20o%20valor%20recomendado%20para,8%2C5%25%20ao%20ano>>. Acesso em: 10 de fev. de 2022.

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

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

MOGAWER, W. S.; AUSTERMAN, A. J.; KLUTZ, R.; PUCHALSKI, S. Using polymer modification and rejuvenators to improve the performance of high reclaimed asphalt pavement mixtures. **Transportation Research Record**, v. 2575, n. 1, p. 10-18, 2016.

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

MOLLENHAUER, K.; GASPAR, L. Synthesis of European knowledge on asphalt recycling: options, best practices and research needs. **Synthesis**, v. 5, 2012.

MORAES, T. M. R. P. **Utilização da cera de carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

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

MORSALI, S.; YÜCEL İŞILDAR, G. Determination of Environmental Impacts of Bituminous Highway's by Life Cycle Assessment. **Computational Engineering and Physical Modeling**, v. 3, p. 38–50, 2020.

MOSCHETTI, R.; MAZZARELLA, L.; NORD, N. An overall methodology to define reference values for building sustainability parameters. **Energy And Buildings**, v. 88, p. 413-427, 2015.

MOTTA, R. D. S. **Estudo de Misturas Asfálticas Mornas em Revestimento de Pavimentos para redução de Emissão de Poluentes e de Consumo Energético**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MOVILLA-QUESADA, D.; RAPOSEIRAS, A.C.; LAGOS-VARAS, M.; MUÑOZ-CÁCERES, O.; ANDRÉS-VALERI, V.C.; TRONCOSO, L. Study of the optimal dosage of cellulose ash as a contribution filler in asphalt mixtures based on its adhesiveness under moisture conditions. **Sustainability**, v. 13, p. 1-16, 2021.

NASCIMENTO, L. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso compactador giratório e foco na deformação permanente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

NASKAR, M.; REDDY, K.S.; CHAKI, T.K.; DIVYA, M.K.; DESHPANDE, A.P. Effect of ageing on different modified bituminous binders: comparison between RTFOT and radiation ageing. **Materials and Structures**, v. 46, n.7, p.1227–1241, 2013.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **NCHRP Report 452: Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual**, 2011.

NOGUEIRA, R.L.; SOARES, J.B.S.; SOARES, S.A. Rheological evaluation of cotton seed oil fatty amides as a rejuvenating agent for RAP oxidized asphalts. **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 1145-1153, 2019.

OLIVEIRA, B. I. F. **Avaliação do custo do ciclo de vida de materiais cimentícios: estudo para argamassas industrializadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

OLIVEIRA, J. A. **Grau de saponificação de óleos vegetais na flotação seletiva de apatita de minério carbonatítico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) Universidade Federal de Ouro Preto, 2005.

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

PARK, J.; SARKIS, J.; WU, Z. Creating integrated business and environmental value within the context of China's circular economy and ecological modernization. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, p. 1494–1501, 2010.

PÉREZ-MARTÍNEZ, M.; MORENO-NAVARRO, F.; MARTÍN-MARÍN, J.; RÍOS-LOSADA, C.; RUBIO-GÁMEZ, M.C. Analysis of cleaner technologies based on waxes and surfactant additives in road construction. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 374-379, 2014.

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

PERRATON, D.; DI BENEDETTO, H.; SAUZÉAT, C.; DE LA ROCHE, C.; BANKOWSKI, W.; PARTL, M.; GRENFELL, J. Rutting of bituminous mixtures: wheel tracking tests campaign analysis. *Materials and Structures*, v. 44, p. 969-986, 2010.

PORTUGAL, A.C.X. **Avaliação reológica de cimentos asfálticos de petróleo modificados com óleo de soja e de milho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

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

PRADHAN, S.K.; SAHOO, U.C. Performance assessment of aged binder rejuvenated with Polanga oil. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, v. 6, n. 6, p. 608-620, 2019.

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

PRETEL, R.; ROBLES, A.; RUANO, M. V.; SECO, A.; FERRER, J. Economic and environmental sustainability of submerged anaerobic MBRbased (AnMBR-based) technology as compared to aerobic-based technologies for moderate- /high-loaded urban wastewater treatment. **Journal of Environmental Management**, v. 166, p. 45-54, 2016.

RADZISZEWSKI, P.; SARNOWSKI, M.; KRÓL, J.; POKORSKI, P.; JASKUŁA, P.; RYŚ, D.; PSZCZOŁA, M. Low-temperature requirements for bitumen in central east european road construction. **The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering**, v. 14, p. 249-270, 2019.

RAHBAR-RASTEGAR, R. **Cracking in Asphalt Pavements: Impact of Component Properties and Aging on Fatigue and Thermal Cracking**. University of New Hampshire, New Hampshire, USA, Ph.D. Dissertation, 2017.

REN, S.; LIU, X.; WANG, H.; FAN, W.; ERKENS, S. Evaluation of rheological behaviors and anti-aging properties of recycled asphalts using low-viscosity asphalt and polymers. **Journal of Cleaner Production**, v. 253, 2020.

REYES-ORTIZ, O.; BERARDINELLI, E.; ALVAREZ, A. E.; CARVAJAL-MUÑOZ, J. S.; FUENTES, L. G. Evaluation of hot mix asphalt mixtures with replacement of aggregates by reclaimed asphalt pavement (RAP) material. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 53, p. 379-388, 2012.

RIBEIRO, R. A.; NEYELOFF, J.; ITRIA, A.; SANTOS, V. C. C.; VIANNA, C. M. M.; SILVA, E. N.; ELIAS, F. T. S.; WICHMANN, R.; SOUZA, K.; CRUZ, L. N.; AZEREDO-DA-SILVA, A. L. F. Diretriz metodológica para estudos de avaliação econômica de tecnologias em saúde no Brasil. **Jornal Brasileiro de Economia da Saúde**, v. 8, n. 3, p. 174-184, 2016.

RODRIGUES, F. Produção mundial de óleos vegetais deve bater recorde em 2016. BiodieselBR, 2016. Disponível em: < <https://www.biodieselbr.com/noticias/materia-prima/soja1/producao-mundial-oleos-vegetais-deve-bater-recorde-2016-280916>>. Acesso em: 25 de out. de 2021.

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

RUBIO, M. D. C., MORENO, F., MARTÍNEZ-ECHEVARRÍA, M. J., MARTÍNEZ, G., E VÁZQUEZ, J. M. Comparative analysis of emissions from the 85 manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt. **Journal of Cleaner Production**, v. 41, p. 1–6, 2013.

SAFAEI, F.; CASTORENA, C.; KIM, Y.R. Linking asphalt binder fatigue to asphalt mixture fatigue performance using viscoelastic continuum damage modeling. **Mechanics of Time-Dependent Materials**, v. 20, p. 299-323, 2016.

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

SALES, P. M. **Avaliação das Características Físicas e Mecânicas de Misturas Asfálticas Modificadas com Adição do CCBIT**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

SANCHEZ-ALONSO, E.; CASTRO-FRESNO, D.; VEGA-ZAMANILLO, A.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, J. Sustainable asphalt mixes: Use of additives and recycled materials | Kestvad asfaltsegud: Lisandite ja taaskasutatava materjali kasutamine. **The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering**, v. 6, p. 249-257, 2011.

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

SANTOS, C. **Avaliação das influências do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SANTOS, N.S. **Propriedades reológicas do ligante asfáltico (CAP 50/70) modificado por adição de lignina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

SEGUNDO, I. G. R.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; VASCONCELLOS, K. L.; *et al.* Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado. **Revista Transportes**, v. 24, n. 4, p. 85-94. 2016.

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

SHAHBANDEH, M. **Production of major vegetable oils worldwide from 2012/13 to 2020/2021, by type (in million metric tons)**. Statista, 2021. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/263933/production-of-vegetable-oils-worldwide-since-2000/#:~:text=The%20production%20volume%20of%20vegetable,200%20million%20metric%20tons%20worldwide>>. Acesso em: 19 de jan de 2022.

SHEN, J.; AMIRKHANIAN, S.; MILLER, J. A. Effects of rejuvenating agents on superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 19, n. 5, p. 376-384, 2007.

SHI, C.; CAI, X.; WANG, T.; YI, X.; LIU, S.; YANG, J.; LENG, Z. Energy-based characterization of the fatigue crack density evolution of asphalt binders through controlled-stress fatigue testing. **Construction and Building Materials**, v. 300, 2021.

SILVA, G. A. M.; RÓS, P. C. M.; SOUZA, L. T. A.; COSTA, A. P. O.; CASTRO, H. F. Physico-chemical, spectroscopical and thermal characterization of biodiesel obtained by

enzymatic route as a tool to select the most efficient immobilized lipase. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 29, n. 1, p. 39-47, 2012.

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

SISTEMA NACIONAL DE PREÇOS E ÍNDICES PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL.

Referências de Preços e Custos. 2021.

SOBREIRO, F. **Efeito da adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com copolímero SBS**. Tese (Doutorado em Infra-Estrutura de Transportes). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

SOENEN, H.; LA ROCHE, C.; REDELIUS, P. Fatigue behaviour of bituminous materials: from binders to mixes. **Road Materials and Pavement Design**, v. 4, p. 7-27, 2003.

SONG, W.; HUANG, B.; SHU, X. Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement. **Journal of Cleaner Production**, v. 192, p. 191-198, 2018.

SOTOODEH-NIA, Z.; MANKE, N.; WILLIAMS, R. C.; COCHRAN, E. W.; POROT, L.; CHAILLEUX, E.; PRESTI, D. L.; CARRIÓN, A. J. D. B.; BLANC, J. Effect of two novel bio-based rejuvenators on the performance of 50% RAP mixes—a statistical study on the complex modulus of asphalt binders and asphalt mixtures. **Road Materials and Pavement Design**, v. 22, pp. 1-18, 2019.

SOUZA, J.L.S. **Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado com Óleo de Mamona**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

STAHEL, W.R. The circular economy. **Nature**, v. 531, p. 435-38, 2016.

STAHEL, W.R. The service economy: ‘Wealth without resource consumption’? *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Physical and Engineering Sciences*, v. 355, n. 1728, p. 1309–1319, 1997.

STAHEL, W.R.; REDAY-MULVEY, G. **The Potential for Substituting Manpower for Energy Commission of the European Communities**, Geneva Research Centre, 1976.

STIMILLI, A.; VIRGILI, A.; CANESTRARI, F. Warm recycling of flexible pavements: Effectiveness of Warm Mix Asphalt additives on modified bitumen and mixture performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 156, p. 911-922, 2017.

SU, B.; HESHMATI, A.; GENG, Y.; YU, X. A review of the circular economy in China: Moving from rhetoric to implementation. **Journal of Cleaner Production**, v. 42, p. 215–227, 2013.

SUN, D.; SUN, G.; DU, Y.; ZHU, X.; LU, T.; PANG, Q.; SHI, S.; DAI, Z. Evaluation of optimized bio-asphalt containing high content waste cooking oil residues. **Fuel**, n. 202, p. 529-540, 2017.

SUN, Z. et al. Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 496-504, 2016.

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

TABATABAEE, H. A.; KURTH, T.L. Analytical investigation of the impact of a novel bio-based recycling agent on the colloidal stability of aged bitumen. **Road Materials and Pavement Design**, v. 18, n. 2, p. 131-140, 2017.

TAHERKHANI, H.; NOORIAN, F. Comparing the effects of waste engine and cooking oil on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement (RAP). **Road Materials and Pavement Design**, v. 21, n. 5, p. 1-20, 2018.

TAHERKHANI, H.; NOORIAN, F. Investigating Permanent Deformation of Recycled Asphalt Concrete Containing Waste Oils as Rejuvenator Using Response Surface Methodology (RSM). **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, v. 45, n. 2, p. 1989–2001, 2021.

TAHERKHANI, H.; NOORIAN, F.: Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement and waste cooking oil as recycling agent. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 22, n. 5, 2019.

VANDEWALLE, D.; ANTUNES, V.; NEVES, J.; FREIRE, A.C. Assessment of eco-friendly pavement construction and maintenance using multi-recycled rap mixtures. **Recycling**, v. 5, p. 1-21, 2020.

VISENTAINER, J. V.; FRANCO, M. R. **Ácidos Graxos em Óleos e Gorduras: Identificação e Quantificação**. Campinas: Ed. Unicamp, 2006.

WANG, C.; XUE, L.; XIE, W.; YOU, Z.; YANG, X. Laboratory investigation on chemical and rheological properties of bioasphalt binders incorporating waste cooking oil.

Construction and Building Materials, v. 167, p. 348-358, 2018.

WEST, R. C.; COPELAND, A. **High RAP Asphalt Pavements: Japan Practice-Lesson Learned** (No. IS 139), 2015.

WOERFEL, J. B. **Soybean oil processing byproducts and their utilization**. In: ERICKSON, D. R. **Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization**. Champaign: AOCS Press, p. 297-313, 1995.

XINGYU, Y.; RUIKUN, D.; NAIPENG, T. Development of a novel binder rejuvenator composed by waste cooking oil and crumb tire rubber. **Construction and Building Materials**, v. 236, 117621, 2020.

YAN, K.; LAN, H.; DUAN, Z.; LIU, W.; YOU, L.; WU, S.; MILIJKOVIC, M. Mechanical performance of asphalt rejuvenated with various vegetable oils. **Construction and Building Materials**, v. 293, n. 1, 2021.

YAN, K.; PENG, Y.; YOU, L. Use of tung oil as a rejuvenating agent in aged asphalt: Laboratory evaluations. **Construction and Building Materials**, v. 239, pp. 1-11, 117783, 2020.

YANG, R.; KANG, S.; OZER, H.; AL-QADI, I.L. Environmental and economic analyses of recycled asphalt concrete mixtures based on material production and potential performance. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 104, p. 141-151, 2015.

YAO, Z.; ZHANG, J.; GAO, F.; LIU, S.; YU, T. Integrated utilization of recycled crumb rubber and polyethylene for enhancing the performance of modified bitumen. **Construction and Building Materials**, v. 170, p. 217–224, 2018.

YOUSEFI, A.; BEHNOOD, A.; NOWRUZI, A.; HAGHSHENAS, H. Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP). **Construction and Building Materials**, v. 268, 2021.

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

ZARGAR, M.; AHMADINIA, E.; ASLI, H.; KARIM, M. R. Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. **Journal of Hazardous Materials**, v. 233, p. 254-258, 2012.

ZAUMANIS, M.; BOESIGER, L.; KUNZ, B.; CAVALLI, M. C.; POULIKAKOS, L. Determining optimum rejuvenator addition location in asphalt production plant. **Construction and Building Materials**, v. 198, p. 368-378, 2019.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B. Finite element modeling of rejuvenator diffusion in RAP binder film–simulation of plant mixing process. **Multi-Scale Modeling and Characterization of Infrastructure Materials**, p. 407-419, 2013.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; POULIKAKOS, L.; FRANK, R. Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 538-550, 2014.

ZAUMANIS, M; MALLICK, R. B. Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant produced pavements: state of the art. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 16, n. 1, 2015.

ZAUMANISA, M.; MALLICKA, R.B.; FRANKB, R. 100% recycled hot mix asphalt: a review and analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 92, p. 230-245, 2014.

ZHANG, J.; GUO, C.; CHEN, T.; ZHANG, W.; YAO, K.; FAN, C.; LIANG, M.; GUO, C.; YAO, Z. Evaluation on the mechanical performance of recycled asphalt mixtures incorporated with high percentage of RAP and self-developed rejuvenators. **Construction and Building Materials**, v. 269, 2020a.

ZHANG, J.; SUN, C.; LI, P.; JIANG, H.; LIANG, M.; YAO, Z.; ZHANG, X.; AIREY, G. Effect of different viscous rejuvenators on chemical and mechanical behavior of aged and recovered bitumen from RAP. **Construction and Building Materials**, v. 239, 2020b.

ZHANG, J.; ZHANG, X.; LIANG, M.; JIANG, H.; WEI, J.; YAO, Z. Influence of different rejuvenating agents on rheological behavior and dynamic response of recycled asphalt mixtures incorporating 60% RAP dosage. **Construction and Building Materials**, v. 238, 2020c.

ZHANG, K.; XIE, W.; ZHAO, Y. Permanent deformation characteristic of asphalt mixture under coupling effect of moisture, overload and loading frequency. **Construction and Building Materials**, v. 272, 2021.

ZHANG, R.; WANG, H.; JIANG, X.; YOU, Z.; YANG, X.; YE, M. Thermal storage stability of bio-oil modified asphalt. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 4, 2018.

ZHANG, Z.; OESER, M. Fatigue response and damage accumulation law of asphalt binder after nonlinear viscoelastic cyclic shear loads. **International Journal of Fatigue**, v. 146, 2021.

ZHU, H.; XU, G.; M. GONG, M.; YANG, J. Recycling long-term-aged asphalts using bio-binder/plasticizer-based rejuvenator. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 117-129, 2017.

ZIARI, H.; MONIRI, A.; BAHRI, P.; SAGHAFI, Y. The effect of rejuvenators on the aging resistance of recycled asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 89–98, 2019.