



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

**ABORDAGEM MULTIDIMENSIONAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM
ELEVADO TEOR DE RAP REJUVENESCIDAS COM ÓLEO DE BABAÇU**

Campina Grande - PB

2025

OSIRES DE MEDEIROS MELO NETO

**ABORDAGEM MULTIDIMENSIONAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM
ELEVADO TEOR DE RAP REJUVENESCIDAS COM ÓLEO DE BABAÇU**

Tese 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 Doutor em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração: Geotecnia.

Linha de Pesquisa: Mecânica e Gerência de Pavimentos.

Orientadora: Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo
Lopes Lucena

Coorientadora: Dra. Luciana de Figueirêdo Lopes
Lucena

Campina Grande – PB

2025

M528a Melo Neto, Osires de Medeiros.
Abordagem multidimensional de misturas asfálticas com elevado teor de rap rejuvenescidas com óleo de babaçu / Osires de Medeiros Melo Neto. – Campina Grande, 2025.
336 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2025.

"Orientação: Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena, Dra. Luciana de Figueirêdo Lopes Lucena".

Referências.

1. Misturas Asfálticas – Desempenho Mecânico. 2. Economia Circular. 3. Bioeconomia. 4. Reologia. 5. Mecânica e Gerência de Pavimentos. 6. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). 7. Óleo Vegetal. 8. Envelhecimento Térmico. I. Lucena, Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes. II. Lucena, Luciana de Figueirêdo Lopes. III. Título.

CDU 625.85(043.2)

OSIRES DE MEDEIROS MELO NETO

**ABORDAGEM MULTIDIMENSIONAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM
ELEVADO TEOR DE RAP REJUVENESCIDAS COM ÓLEO DE BABAÇU**

Tese apresentada 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 Doutor em Engenharia Civil e Ambiental, área de concentração Geotecnia, linha de pesquisa Mecânica e Gerência de Pavimentos.

Tese aprovada em: 09/05/2025.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena – UFCG
(Orientadora)

Profa. Dra. Luciana de Figueirêdo Lopes Lucena – UFRN
(Coorientadora)

Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues– UFCG
(Membro Interno)

Profa. Dra. Zila Maria Garcia Mascarenhas– UFMA
(Membro Externo)

Prof. Dr. Fabiano Pereira Cavalcante
(Membro Externo)

Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht – UFSM
(Membro Externo)



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 DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

2. **ALUNO(A): OSIRES DE MEDEIROS MELO NETO / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.^a LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR.^a LUCIANA DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - COORIENTADORA, DR. JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES – PPGECA/UFCG – EXAMINADOR INTERNO, DR.^a ZILA MARIA GARCIA MASCARENHAS - UFMA – EXAMINADORA EXTERNA, DR. FABIANO PEREIRA CAVALCANTE - EXAMINADOR EXTERNO, DR. LUCIANO PIVOTO SPECHT – UFSM - EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 17/2025). / TÍTULO DA TESE: “ABORDAGEM MULTIDIMENSIONAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM ELEVADO TEOR DE RAP REJUVENESCIDAS COM ÓLEO DE BABAÇU” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INÍCIO: 08:00 HORAS / NA SALA DE TELECONFERÊNCIA DO LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS, BLOCO CT, CAMPUS SEDE DA UFCG, DE FORMA HÍBRIDA.**

3. **EM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) ALUNO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA TESE, SENDO-LHE ATRIBUÍDO 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 TESE, 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, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO(A), ALUNO(A) E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**

4. **CAMPINA GRANDE, 09 DE MAIO DE 2025**

5.

6.

7.

Documento assinado digitalmente
 **ZILA MARIA GARCIA MASCARENHAS**
Data: 13/05/2025 09:50:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

8.

9. **DR.^a ZILA MARIA GARCIA MASCARENHAS - UFMA – EXAMINADORA EXTERNA**

10.

11.

12.

13.

14.

DR. LUCIANO PIVOTO SPECHT – UFSM - EXAMINADOR EXTERNO

Documento assinado eletronicamente por **FABIANO PEREIRA CAVALCANTE, Usuário Externo**, em 12/05/2025, às 11:13, 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(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/05/2025, às 11:15, 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 12/05/2025, às 11:15, 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 **Luciana de Figueirêdo Lopes Lucena, Usuário Externo**, em 12/05/2025, às 11:18, 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 12/05/2025, às 12:01, 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 **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 12/05/2025, às 13:52, 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 **5454488** e o código CRC **11FA0568**.

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese à minha família. Sem vocês, esta etapa não teria sido concluída. Em especial aos meus pais, *Francinete e Charley*, minhas inspirações de vida.

AGRADECIMENTOS

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

Deus, obrigado por ser minha fonte de força, fé e esperança. Nos dias nublados, é a sua luz que me faz continuar caminhando, sem que eu me perca no trajeto. Diante da minha pequenez, o Senhor me fez grande, mesmo quando nem eu acreditava em mim. Gratidão por todas as conquistas alcançadas e por se fazer presente em meus dias. Ao meu São José e à Nossa Senhora do Carmo, obrigado por intercederem sempre por mim.

Aos meus pais, Francinete e Charley, que são minha base de amor e dedicação. Nestes meus 30 anos de vida, senti-me amado em todos os dias, e vocês não mediram esforços para que eu conseguisse alcançar esta meta. Não foi fácil. As renúncias para criar e cuidar de seus filhos são exemplos de vida que levarei comigo por onde eu for. Amo muito vocês.

Thâmara, minha irmã querida, obrigado por ser sinônimo de entusiasmo, felicidade, simpatia, alto astral e amor. Sua bondade e seu carisma alegam meus dias e me tornam uma pessoa melhor. Agora, com meu sobrinho amado Levi, temos ainda mais motivos para celebrar a alegria em nossa família.

Gustavo, meu companheiro de vida e de profissão, obrigado por ser meu braço direito em todas as situações. Sua bondade, alegria, garra e perseverança são um espelho para mim no dia a dia. Você me ensinou a não desistir dos sonhos, mesmo quando o mundo não nos abre portas, lutando diante dos obstáculos, das injustiças, dos preconceitos e da maldade.

Minha querida orientadora, Lêda Lucena, obrigado pela oportunidade, por ter me acolhido e acreditado em mim desde o mestrado. Meu respeito por sua conduta profissional só cresce. Você é minha inspiração acadêmica e científica. Ensinou-me os primeiros passos na vida acadêmica — no estágio docência, na escrita de artigos, entre outros — sempre com responsabilidade e gentileza. Agradeço por todas as oportunidades e ensinamentos acadêmicos, que levarei comigo por toda a vida.

À minha coorientadora, Luciana Lucena, obrigado pela oportunidade e por me desafiar com conhecimentos mais abrangentes, que enriqueceram imensamente minha formação. Agradeço pelo carinho, pelos ensinamentos e por todas as orientações. Você também é uma inspiração para a minha trajetória acadêmica.

À minha família, em especial à Vovó Terezinha, Tia Neide e Tia Mere, obrigado por todo o carinho, amor e incentivo. Amo vocês.

Ao meu companheiro de quatro patas, Hórus, agradeço por ter trazido alegria e leveza aos meus dias, especialmente após longas jornadas no laboratório. Os momentos de passeio e brincadeira ao seu lado foram fundamentais para renovar minhas energias. Amo você.

Aos meus amigos de vida, Dilma, Ana Li, Juan, Miguel, Yáscara, Mateus, Victor, Julyanna, José Lucas, Mara, Waleska, Fernandes, Anderson, Kênia, Fabrício e João Paulo, obrigado por compartilharem o lado bom da vida e tornarem o percurso mais leve.

Aos meus amigos que o LEP me proporcionou, Ingridy, Ana Maria, Talita, Albaniza, Vitória, Maria Ingridy, Thiago, Priscila, Laiana, Daniel, Alisson, Juliete, Mateus, Lara, Milena, Alcidney, Leonardo, Gilson, Manoel e Ana Letícia, obrigado por compartilharem os dias intensos no laboratório, as disciplinas cursadas, os congressos, as aflições e as vitórias.

Aos professores do PPGECA, Adriano Lucena, John Kennedy, Ana Maria, Veruschka Escarião, Carina Silvani, William de Paiva e Jonny Patrício, agradeço por todos os ensinamentos na área de Geotecnia e Infraestrutura de Transportes.

Aos funcionários do LEP, Arthur, Jadilson, Joseildo e Ladjane, agradeço por compartilharem o dia a dia no laboratório e por todo o auxílio fornecido.

Aos pesquisadores do Egito, Abdelhalim Azam, Walaa Shaltout e Ahmed Youssef, agradeço pelas análises químicas e todo o auxílio científico.

Aos membros do grupo focal pela valiosa contribuição, tempo dedicado, discussões técnicas e aprendizados proporcionados durante o processo de validação do ICM e IICS_{MAR}.

À banca examinadora, Zila Mascarenhas, John Kennedy, Fabiano Cavalcante e Luciano Specht, agradeço por todas as contribuições acadêmicas.

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

À CNPq, pela bolsa de estudos concedida.

À AmazonOil, pela doação do óleo de babaçu para a análise deste 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 doutorado.

À Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) e à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), por meio dos laboratórios de Síntese Orgânica e Produtos Naturais (LSOPN) da UEPB e de Materiais Multifuncionais e Nanocompósitos (LAMMEN) da UFRN, por proporcionarem a realização dos ensaios de rotaevaporação e FTIR das amostras de ligante asfáltico, respectivamente.

Ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia (FAET) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), agradeço pela autorização do afastamento que possibilitou minha participação presencial na defesa deste trabalho.

ARTIGOS DA TESE

Os resultados desta pesquisa foram organizados em cinco artigos científicos, distribuídos ao longo dos quatro capítulos de resultados: dois artigos correspondem ao Capítulo 3, um artigo abrange os Capítulos 4 e 5, e dois artigos estão vinculados ao Capítulo 6. Os artigos referentes ao Capítulo 3 já foram elaborados e publicados, enquanto os demais encontram-se em fase de produção.

Capítulo 3:

Assessment of rheological properties of asphalt binder modified with babassu oil – Publicado no periódico *Case Studies in Construction Materials* em 2024 (Qualis A2 – Jcr (2023) de 6,5);

Significance of Babassu Oil as a Rejuvenating on the Chemical and Rheological Properties of the Recovered Asphalt Binders – Publicado no periódico *Journal of Materials in Civil Engineering* em 2025 (Qualis A2 – Jcr (2023) de 3,1).

Capítulo 4 e Capítulo 5:

Effects of high RAP and babassu oil contents on the mechanistic and economic performance of asphalt mixtures – Em elaboração.

Capítulo 6:

A scoping review of methodological approaches for measuring circularity in pavement engineering – Em elaboração;

Determining the circularity of recycled asphalt mixtures through an integrated circularity and sustainability index - Em elaboração.

“Faça o melhor que puder até saber mais. Então, quando souber mais, faça ainda melhor.”

Maya Angelou

RESUMO

A incorporação de teores superiores a 30% de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) em misturas asfálticas enfrenta limitações devido à elevada rigidez do RAP, tornando necessária a utilização de aditivos rejuvenescedores, como óleos vegetais. Nesse contexto, o óleo de babaçu surge como uma alternativa, diversificando as fontes renováveis e reduzindo a dependência de um único insumo. Este estudo avaliou a viabilidade da adição deste óleo em misturas recicladas por meio de quatro etapas: (i) caracterização física, química e reológica de ligantes asfálticos virgens e recuperados modificados com teores de óleo de babaçu variando entre 1% e 12%, incluindo a análise dos efeitos do envelhecimento de curto e longo prazo; (ii) avaliação do desempenho mecânico de misturas contendo 0%, 15%, 56%, 63% e 70% de RAP, com ensaios de resistência à tração indireta, módulo de resiliência, dano por umidade induzida, deformação permanente, fadiga e desgaste; (iii) análise econômica considerando custos de produção e valor presente líquido (VPL), bem como a influência das distâncias de transporte; e (iv) análise ambiental com base em índices de circularidade. O uso do óleo de babaçu proporcionou redução na rigidez dos ligantes recuperados, mitigação do envelhecimento térmico a partir de 3% de adição e aumento da vida de fadiga sob maiores deformações. As misturas recicladas apresentaram desempenho mecânico equivalente à mistura de controle na maioria dos ensaios, entretanto, a mistura com 70% de RAP e 7% de óleo se destacou pelo desempenho superior na resistência à fadiga. A composição contendo 70% de RAP e 7% de óleo sobressaiu-se como a mais circular e econômica, com redução de custos de produção de até 72,98% por quilômetro pavimentado. A análise integrada de circularidade, custos e emissões de CO₂ ressaltou o potencial do óleo de babaçu em aumentar a eficiência e sustentabilidade de misturas recicladas.

Palavras-chave: Bioeconomia, Circularidade, Custos, Desempenho mecânico, Economia circular, Envelhecimento, FTIR, Material Fresado, Óleo vegetal, Reologia.

ABSTRACT

The incorporation of more than 30% Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in asphalt mixtures faces limitations due to the high stiffness of RAP, making the use of rejuvenating additives, such as vegetable oils, necessary. In this context, babassu oil emerges as an alternative, diversifying renewable sources and reducing reliance on a single input. This study evaluated the feasibility of adding this oil to recycled mixtures through four stages: (i) physical, chemical, and rheological characterization of virgin and recovered asphalt binders modified with babassu oil contents ranging from 1% to 12%, including analysis of short- and long-term aging effects; (ii) mechanical performance evaluation of mixtures containing 0%, 15%, 56%, 63%, and 70% RAP, using indirect tensile strength, resilient modulus, moisture-induced damage, permanent deformation, fatigue, and abrasion tests; (iii) economic analysis considering production costs and net present value (NPV), as well as the influence of transportation distances; and (iv) environmental analysis based on circularity indices. The use of babassu oil resulted in reduced stiffness of the recovered binders, mitigation of thermal aging from 3% addition onward, and increased fatigue life under higher strain levels. The recycled mixtures exhibited mechanical performance comparable to the control mixture in most tests; however, the mixture containing 70% RAP and 7% oil stood out due to its superior fatigue resistance. The composition with 70% RAP and 7% oil proved to be the most circular and cost-effective, with production cost reductions of up to 72.98% per paved kilometer. The integrated analysis of circularity, costs, and CO₂ emissions highlighted the potential of babassu oil to enhance the efficiency and sustainability of recycled mixtures.

Keywords: Bioeconomy, Circularity, Costs, Mechanical Performance, Circular Economy, Aging, FTIR, Reclaimed Material, Vegetable Oil, Rheology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução do envelhecimento do revestimento asfáltico em termos de viscosidade do ligante (η_i é a viscosidade não envelhecida; $\eta_t = 0$ é a viscosidade de curto prazo envelhecida correspondente à condição de mistura; $\eta_{\text{envelhecido}}$ é a viscosidade envelhecida a longo prazo correspondente à condição em serviço do pavimento).....	53
Figura 2 - Definição do fluxo de cálculo dos parâmetros do ICM.....	62
Figura 3 – Fluxograma para cálculo do Índice de circularidade das misturas asfálticas.	63
Figura 4 - Etapas relacionadas aos custos do revestimento asfáltico de rodovias.	64
Figura 5 - Fluxograma da avaliação dos ligantes asfálticos com óleo de babaçu.....	76
Figura 6 - Óleo de babaçu.....	78
Figura 7 - RAPs utilizados nesse estudo.....	81
Figura 8 - Processo de recuperação dos ligantes asfálticos no rotaevaporador.	82
Figura 9 - Blending Chart para os ligantes modificados com óleo de babaçu.....	90
Figura 10 - Blending charts para misturas recicladas: (a) RA1, (b) RA2.	94
Figura 11 - Módulo de cisalhamento dinâmico (G^*) do ligante asfáltico modificado: (a) antes do RTFO, (b) após o RTFO.	104
Figura 12 - Módulo de cisalhamento dinâmico (G^*) do ligante asfáltico modificado após o LTA.	108
Figura 13 - Variação dos valores de PG contínuo em função do teor de óleo de babaçu e da condição de envelhecimento.	110
Figura 14 - Módulo de cisalhamento dinâmico (G^*) do ligante asfáltico envelhecido a longo prazo (LTA) com óleo de babaçu: (a) com adição direta do óleo, (b) com adição do ligante modificado pelo óleo.	115
Figura 15 - Valores de PG contínuo das amostras de ligante asfáltico envelhecido a longo prazo (LTA) modificadas com óleo de babaçu, considerando diferentes formas de adição do óleo.	117
Figura 16 - Curvas de FTIR das amostras estudadas.	120
Figura 17 - Valores de PG contínuo dos ligantes recuperados modificados com óleo de babaçu.	123
Figura 18 - Valores de módulo de cisalhamento dinâmico (G^*) para os ligantes recuperados: (a) RA1, (b) RA2.....	125

Figura 19 - Parâmetro A e Parâmetro B obtidos no ensaio LAS: (a) RA1, (b) RA2.	129
Figura 20 - Curvas de tensão versus deformação dos ligantes asfálticos recuperados.	131
Figura 21 - Estimativa da vida de fadiga dos ligantes asfálticos recuperados.	133
Figura 22 - Curvas de FTIR dos ligantes asfálticos recuperados e rejuvenescidos.	137
Figura 23 - Resumo gráfico da avaliação das misturas asfálticas recicladas.	141
Figura 24 - Curvas de distribuição dos tamanhos dos grãos dos agregados virgens.	143
Figura 25 - Curvas granulométricas do RAP.	145
Figura 26 – Faixas granulométricas inferior, intermediária e superior.	146
Figura 27 - Faixas granulométricas das misturas asfálticas recicladas.	149
Figura 28 - Amostras das misturas asfálticas: (a) misturas soltas, (b) agregados graúdos no ensaio de adesividade.	152
Figura 29 - Fluxograma do dimensionamento MeDiNa.	163
Figura 30 - Resistência à tração indireta das misturas asfálticas.	164
Figura 31 - Gráfico de probabilidade normal para o ensaio de resistência à tração indireta.	167
Figura 32 - Resistência retida à tração indireta das misturas asfálticas.	169
Figura 33 - Gráfico de probabilidade normal para o ensaio de resistência retida à tração indireta.	172
Figura 34 - Módulo de resiliência das misturas asfálticas.	174
Figura 35 - Gráfico de probabilidade normal para o ensaio de módulo de resiliência.	176
Figura 36 -Flow Number das misturas asfálticas.	178
Figura 37 - Gráfico de probabilidade normal para o ensaio de Flow Number.	181
Figura 38 - Número de ciclos até a ruptura versus: (a) diferença de tensões, (b) deformação específica resiliente.	183
Figura 39 - Gráfico de probabilidade normal para o ensaio de fadiga por tração indireta.	187
Figura 40 – Perda de massa das misturas asfálticas por desgaste cântabro.	192
Figura 41 - Correlação entre RRTI e Desgaste Cântabro das misturas asfálticas.	192
Figura 42 - Gráfico de probabilidade normal para o ensaio de Desgaste Cântabro.	194
Figura 43 - Pavimento padrão utilizado no dimensionamento pelo software MeDiNa.	197
Figura 44 - Dados da análise mecanicista do software MeDiNa: (a) classes de fadiga, (b) % de área trincada, (c) afundamento na trilha de roda (mm).	200
Figura 45 - Espessuras das camadas do pavimento flexível considerando a variabilidade das misturas asfálticas.	201

Figura 46 - Definição dos pontos avaliados na análise AEMC do pavimento.	203
Figura 47 - Novas espessuras das camadas do pavimento após AEMC.	208
Figura 48 - Logística de produção à construção das misturas asfálticas avaliadas.	215
Figura 49 - Custos de produção por km de rodovia para as misturas asfálticas: (a) momento de transporte de 50 km, (b) momento de transporte de 100 km.	224
Figura 50 - Fluxograma das etapas para determinação da circularidade das misturas asfálticas.	231
Figura 51 - Fluxograma da <i>Scoping Review</i>	233
Figura 52 - Fluxograma PRISMA expondo o fluxo de seleção dos estudos para a <i>Scoping Review</i>	235
Figura 53 - Fluxograma para determinação do ICM das misturas asfálticas.	249
Figura 54 - Gráfico dos valores de fator de utilidade por composição de mistura asfáltica.	255
Figura 55 - ICM das misturas asfálticas.	256
Figura 56 - Valores de $IICS_{MAR}$ das misturas asfálticas em função dos pesos considerados.	271
Figura 57 - Valores de ICM e $IICS_{MAR}$ das misturas asfálticas em função da metodologia de cálculo adotada.	276

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização do ligante PEN 50/70.	77
Tabela 2 - Caracterização química do óleo de babaçu.	78
Tabela 3 - Proporção dos ligantes asfálticos na mistura reciclada.	91
Tabela 4 - Nomenclatura das amostras de ligante asfáltico.	92
Tabela 5 - Proporção dos ligantes asfálticos na mistura reciclada com os diferentes RAPs. ...	95
Tabela 6 - Dados físicos do ligante asfáltico com óleo de babaçu antes e após o RTFO.	97
Tabela 7 - Dados reológicos do ligante asfáltico modificado com óleo de babaçu antes e após o RTFO.	101
Tabela 8 - Resultados reológicos do ligante asfáltico com óleo de babaçu após o LTA.	106
Tabela 9 - Dados reológicos e custos do ligante asfáltico PEN 50/70 com óleos vegetais. ...	111
Tabela 10 - Dados reológicos de ligantes envelhecidos após o LTA com adição do óleo de babaçu.	114
Tabela 11 - Dados do ensaio de PG para os ligantes asfálticos recuperados.	122
Tabela 12 - Dados do ensaio MSCR dos ligantes asfálticos recuperados.	128
Tabela 13 - Equações das curvas de vida de fadiga dos ligantes asfálticos recuperados.	134
Tabela 14 - FFL dos ligantes recuperados sob diferentes amplitudes de deformação.	135
Tabela 15 - Caracterização física dos agregados.	143
Tabela 16 - Resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados RAP.	144
Tabela 17 - Proporções de agregados para a mistura asfáltica de controle.	146
Tabela 18 - Parâmetros volumétricos das misturas com teor de ligante inicial.	147
Tabela 19 - Parâmetros volumétricos da mistura asfáltica de controle para os teores de ligante testados.	147
Tabela 20 - Proporções de agregados das misturas asfálticas recicladas para cada teor de RAP adicionado.	148
Tabela 21 - Parâmetros volumétricos das misturas asfálticas recicladas.	150
Tabela 22 - Relação entre FFM e módulo de resiliência para o número de repetições do eixo padrão para 30% de área trincada.	162
Tabela 23 - Dados estatísticos do teste ANOVA para o ensaio de resistência à tração indireta.	168

Tabela 24 - Dados estatísticos do teste ANOVA para o ensaio de resistência retida à tração indireta.	173
Tabela 25 - Dados estatísticos do teste ANOVA para o ensaio de módulo de resiliência. ...	177
Tabela 26 - Valores limites de Flow Number em função do nível de tráfego.	179
Tabela 27 - Dados estatísticos do teste ANOVA para o ensaio de Flow Number.	181
Tabela 28 - Parâmetros característicos das curvas de vida de fadiga das misturas asfálticas.	184
Tabela 29 - Dados estatísticos do teste ANOVA para o ensaio de Fadiga para o nível de tensão de 40%.	188
Tabela 30 - Dados estatísticos do teste ANOVA para o ensaio de Fadiga para o nível de tensão de 45%.	188
Tabela 31 - Dados estatísticos do teste ANOVA para o ensaio de Fadiga para o nível de tensão de 50%.	189
Tabela 32 - Dados estatísticos do teste ANOVA para o ensaio de Fadiga para o nível de tensão de 55%.	190
Tabela 33 -Dados estatísticos do teste ANOVA para o ensaio de Desgaste Cântabro.	194
Tabela 34 - Análise comparativa de desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas com óleo de babaçu e mistura asfáltica de controle.	195
Tabela 35 - Dados do tráfego do dimensionamento MeDiNa.....	197
Tabela 36 - Dados de entrada do software MeDiNa para todos os tipos de misturas asfálticas analisadas e as camadas de base e sub-base consideradas no software.....	198
Tabela 37 - Resultado da análise AEMC do pavimento considerando as espessuras obtidas no dimensionamento MeDiNa.	209
Tabela 38 - Resultados da análise AEMC considerando o nível de tráfego e as novas espessuras das camadas de revestimento asfáltico para cada tipo de mistura.	211
Tabela 39 - Custos de produção das misturas asfálticas por tonelada de mistura asfáltica. ..	221
Tabela 40 - Quantificações para a determinação dos custos de produção das misturas asfálticas.....	222
Tabela 41 - Fluxo de caixa das misturas asfálticas por km de rodovia.	226
Tabela 42 - Características dos artigos 1 a 3 incluídos na scoping review.....	236
Tabela 43 - Características dos artigos 4 a 6 incluídos na scoping review.....	238
Tabela 44 - Características dos artigos 7 e 8 incluídos na scoping review.....	240

Tabela 45 - Métodos e cálculos utilizados na determinação dos fatores de utilidade do ICM.	248
Tabela 46 - Massa asfáltica por composição de mistura asfáltica para pavimentar 1 km de rodovia.	251
Tabela 47 - Dados de entrada e saída na determinação do ICM das misturas pelos distintos fatores de utilidade.	252
Tabela 48 - Fatores de utilidade corrigidos utilizados no cálculo do ICM das misturas asfálticas.	254
Tabela 49 - Classificação do ICM das misturas asfálticas em função do método de cálculo do fator de utilidade.	260
Tabela 50 - Determinação das emissões de CO ₂ por mistura asfáltica.	266
Tabela 51 - Detalhamento dos cálculos de IICS _{MAR} para as misturas asfálticas.	270
Tabela 52 - Variação percentual dos valores de IICS _{MAR} em relação ao ICM.	272

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
AMPT	<i>Asphalt Mixture Performance Test</i>
AOCS	<i>American Oil Chemists' Society</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BO	Babassu oil/ Óleo de babaçu
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CGS	Compactador Giratório SUPERPAVE
CP	Corpo de Prova
DHR	<i>Discovery Hybrid Rheometer</i>
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
EC	Economia Circular
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FN	<i>Flow Number</i>
FTI	Fadiga por Tração Indireta
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>
ICM	Índice de Circularidade do Material
IE	Índice de Envelhecimento
ISC	Índice de Suscetibilidade Térmica
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducer</i>
LTA	<i>Long-Term Aged</i>
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>
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RBV	Relação Ligante-Vazios
RCC	Resíduos da Construção Civil
RRTI	Resistência Retida à Tração Indireta
RTI	Resistência à Tração Indireta
RTFO	<i>Rolling Thin-Film Oven</i>
SUPERPAVE	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
TMN	Tamanho Máximo Nominal
UEPB	Universidade Estadual da Paraíba

UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
VAM	Vazios no Agregado Mineral
V _v	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	Grama
Gmb	Massa específica aparente medida (g/cm^3)
Gmm	Massa específica 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_t	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
N_f	Número de ciclos de carregamento que leva a amostra à ruptura
ϵ_i	Deformação resiliente inicial
L	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
C	Custos de produção
E	Emissões de CO ₂
E_T	Eficiência do processo de reciclagem como tratamento
E_P	Eficiência do processo de reciclagem como produção
ICM	Índice de circularidade do material
$IICS_{MAR}$	Índice integrado de circularidade e sustentabilidade para misturas asfálticas recicladas
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

CAPÍTULO 1.....	29
1. INTRODUÇÃO.....	29
1.1. OBJETIVOS	33
1.1.1. OBJETIVO GERAL.....	33
1.2. PREMISSAS E HIPÓTESES	34
1.2.1. PREMISSAS.....	34
1.2.2. HIPÓTESES	35
1.3. ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	35
CAPÍTULO 2.....	37
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	37
2.1. MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS	37
2.1.2. AGENTES DE RECICLAGEM EM MISTURAS RECICLADAS.....	40
2.2. ENVELHECIMENTO DE MATERIAIS ASFÁLTICOS.....	51
2.3. ECONOMIA CIRCULAR NA CONSTRUÇÃO CIVIL	57
2.3.1. ASPECTOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	59
2.4. PERSPECTIVAS DA BIOECONOMIA E O ÓLEO DE BABAÇU.....	66
2.5. PONDERAÇÕES	73
CAPÍTULO 3.....	75
3. INVESTIGAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E REOLÓGICA DE LIGANTES ASFÁLTICOS COM ÓLEO DE BABAÇU.....	75
3.1. MATERIAIS	76
3.1.1. LIGANTE ASFÁLTICO.....	76
3.1.2. ÓLEO DE BABAÇU	77

3.1.3. RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP)	80
3.2. MÉTODOS EXPERIMENTAIS	83
3.2.1. ANÁLISE I	83
3.2.2. ANÁLISE II	93
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	96
3.3.1. ANÁLISE I	97
3.3.2. ANÁLISE II	122
3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	139
CAPÍTULO 4	141
4. AVALIAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS COM ÓLEO DE BABAÇU	141
4.1. MATERIAIS	142
4.1.1. LIGANTE ASFÁLTICO VIRGEM E AGENTE REJUVENESCEDOR	142
4.1.2. AGREGADOS VIRGENS	142
4.1.4. RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP)	144
4.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL	145
4.2.1. PROCESSO DE DOSAGEM DAS MISTURAS	145
4.2.2. ANÁLISE DE DESEMPENHO MECÂNICO	153
4.2.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA	159
4.2.4. INFLUÊNCIA DO USO DE RAP E ÓLEO DE BABAÇU NO DIMENSIONAMENTO DA CAMADA DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO	161
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	164
4.3.1. AVALIAÇÃO MECÂNICA	164
4.3.2. DIMENSIONAMENTO DA CAMADA DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO	196
4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	213
CAPÍTULO 5	215

5. ANÁLISE ECONÔMICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS COM ÓLEO DE BABAÇU.....	215
5.2. DETERMINAÇÃO DOS INVESTIMENTOS.....	218
5.5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	220
5.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	228
CAPÍTULO 6.....	230
6. AVALIAÇÃO INTEGRADA DE CIRCULARIDADE E SUSTENTABILIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS COM ÓLEO DE BABAÇU	230
6.1. <i>SCOPING REVIEW</i>	231
6.1.1. METODOLOGIA DA <i>SCOPING REVIEW</i>	232
6.1.2. RESULTADOS E DISCUSSÕES DA <i>SCOPING REVIEW</i>	234
6.2. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE CIRCULARIDADE (ICM) DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	245
6.2.1. METODOLOGIA EMPREGADA PARA CÁLCULO DO ICM	245
6.2.2. RESULTADOS E DISCUSSÕES DO ICM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	250
6.3. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE INTEGRADO DE CIRCULARIDADE E SUSTENTABILIDADE PARA MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS (IICS _{MAR})	262
6.3.1. METODOLOGIA EMPREGADA NA DETERMINAÇÃO DO IICS _{MAR}	263
6.3.2. RESULTADOS E DISCUSSÕES DO IICS _{MAR} DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	269
6.4. SÍNTESE ACERCA DO ICM E IICS _{MAR} DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	274
6.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	278
CAPÍTULO 7.....	280
7. CONCLUSÕES.....	280
7.1. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	283
REFERÊNCIAS	284

APÊNDICE A	320
APÊNDICE B	334

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

O *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), resíduo derivado do processo de fresagem das camadas de revestimento de pavimento flexível, tem sido amplamente reconhecido como uma alternativa viável para ser empregada na produção de novas misturas asfálticas (Jiang *et al.*, 2022; Almusawi; Shoman; Lupanov, 2023; Xing *et al.*, 2023). No Brasil, a incorporação de teores de RAP superiores a 20% é limitada devido à sua elevada rigidez, heterogeneidade e à falta de adaptação das usinas ao processo de produção (de Medeiros Melo Neto, *et al.*, 2022, 2023; Beserra Costa *et al.*, 2023).

A norma brasileira do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) 033 (2021) define as faixas de temperatura para a produção de misturas asfálticas recicladas à quente, considerando teores de RAP e umidade entre 0 e 5%. À medida que a umidade aumenta, eleva-se a temperatura exigida no processo de usinagem, intensificando o consumo energético e a emissão de gases de efeito estufa. Assim, o uso de agentes rejuvenescedores e surfactantes, por exemplo, torna-se essencial em misturas com mais de 20% de RAP, a fim de viabilizar a redução das temperaturas de produção e evitar o envelhecimento excessivo do ligante asfáltico.

De acordo com a *European Asphalt Pavement Association, Brussels* (2020), o uso de RAP em misturas asfálticas quentes e mornas varia entre os países. Em algumas nações, a quantidade incorporada é relativamente baixa (Itália: 25%, Noruega: 28%, Grã-Bretanha: 30%, Holanda: 50%, Espanha: 59%) em comparação com os Estados Unidos, onde o uso atinge 94% (Meroni *et al.*, 2021; Mascarenhas *et al.*, 2023). No Brasil, ainda há escassez de informações precisas sobre a quantidade de RAP disponível e sua porcentagem de utilização em misturas asfálticas quentes. Leite *et al.* (2021) destacam que o RAP tem sido empregado principalmente na pavimentação de estradas rurais e como camada granular na base (Pasche *et al.*, 2014), sem tratamento específico ou aplicação de rejuvenescedor, o que não caracteriza reciclagem, mas sim *downcycling*.

Na China, alguns estudos têm viabilizado a produção de misturas recicladas com 100% de RAP. Yi *et al.* (2022) avaliaram a viabilidade do uso de asfalto epóxi na reciclagem

de uma mistura contendo 100% de pavimento asfáltico recuperado (RAP) e observaram que a mistura reciclada apresentou um aumento de aproximadamente 60% na resistência à deformação permanente, além de comportamento mecânico equivalente à mistura virgem com asfalto epóxi em relação à resistência à fissuração e à umidade. Wang *et al.* (2025) incorporaram um sistema de pré-polímero de poliuretano (PUP) ao ligante asfáltico, desenvolvendo um material de ligação inovador para produzir uma mistura asfáltica totalmente recuperada com 100% de RAP. A mistura reciclada apresentou viabilidade técnica para aplicação em pavimentos sujeitos a tráfego pesado, temperaturas reduzidas ou elevadas variações sazonais, sendo recomendada para a reabilitação de camadas de revestimento deterioradas. Esses avanços refletem o crescente esforço da literatura para otimizar ao máximo o uso de RAP na produção de misturas asfálticas recicladas, viabilizando sua aplicação em teores elevados (Rahman *et al.*, 2025; Xia; Zhao; Tang, 2025; Yao *et al.*, 2025; Zhao; Qian; Yang, 2025).

Diante disso, algumas pesquisas brasileiras (Suzuki *et al.*, 2023; Rodrigues *et al.*, 2023; da Costa *et al.*, 2024) têm sido conduzidas visando metodologias capazes de otimizar a incorporação do RAP em misturas asfálticas (Costa, 2022). Uma alternativa que tem demonstrado restaurar a trabalhabilidade e o desempenho reológico do ligante presente no RAP em misturas asfálticas, mesmo quando o RAP é empregado em quantidades superiores a 20% em relação ao peso total dos agregados, é a utilização de bioligantes derivados de recursos biológicos (animais, vegetais ou de processos industriais) (Carvalho, 2022). Alguns pesquisadores (Zhang; Huchet; Hobbs, 2019; Devulapalli; Kothandaraman; Sarang, 2019; Li *et al.*, 2019; Taherkhani; Noorian, 2020; Xing *et al.*, 2023) destacam a eficácia do uso de óleos vegetais como agentes rejuvenescedores do RAP em misturas asfálticas.

Contudo, há uma necessidade premente de investigar diferentes tipos de óleos vegetais, diversificando as fontes renováveis e reduzindo a dependência de um único insumo. Além disso, é fundamental associar a produção asfáltica à bioeconomia, um modelo industrial que busca substituir recursos fósseis e não renováveis. O óleo de babaçu, extraído de palmeiras oleaginosas dos gêneros *Orbignya* e *Attalea*, da família *Palmae*, é uma opção promissora de óleo vegetal devido à sua composição química, que se assemelha à do óleo de palma. Estudos anteriores apontaram a eficácia do óleo de palma como rejuvenescedor de ligantes asfálticos envelhecidos (Flávia Justino Uchoa *et al.*, 2021; Sánchez; Saldarriaga; Caro, 2022). No Brasil, extensas áreas de babaçuais, totalizando pouco mais de 14.563.000

hectares nativos, estão distribuídas ao sul da bacia amazônica, onde a densa floresta úmida dá lugar à vegetação característica dos cerrados (de Paula Protásio *et al.*, 2014; Sales *et al.*, 2020).

Os Estados do Maranhão, Piauí e Tocantins concentram áreas de matas dominadas pelos babaçus, frequentemente formando agrupamentos uniformes e densos, devido à proximidade entre as palmeiras (de Paula Protásio *et al.*, 2014). De acordo com Frazão (2001), a produção média de frutos de babaçu atinge 2400 kg/ha, dos quais são extraídos 91 litros de óleo. Segundo Zylbersztajn *et al.* (2000), a trituração do coco babaçu resulta na obtenção de dois tipos de óleos: um destinado ao consumo humano e outro de caráter industrial, conhecido como óleo láurico (surfactante). Anjos e Santos (2019) analisaram o mercado consumidor do óleo de babaçu e avaliaram a tendência do valor de exportação do óleo bruto de babaçu brasileiro entre os anos de 2007 e 2016, observando-se o domínio do mercado holandês na importação do óleo bruto. Van Den Bos e Lipschits (2015) destacam que o uso das espécies nativas brasileiras em diversos setores industriais é um fenômeno recente, com poucos atores envolvidos, e que o óleo extraído do babaçu tem demonstrado aplicações tecnológicas, principalmente nas áreas de Ciência de Polímeros, Engenharias, Farmacologia e Energia/Combustível.

Van Den Bos e Lipschits (2015) destacam também a importância do uso das biomassas nativas brasileiras como forma de mitigar impactos ambientais, além de seu grande apelo social, devido à relevância da preservação da biodiversidade brasileira, ao balanço de carbono intrínseco ao ecossistema e à geração de renda para pequenos produtores envolvidos (Afonso; Ângelo, 2009; Gouveia, 2015). O óleo de babaçu surge como uma solução sustentável para o sistema produtivo de misturas asfálticas recicladas, substituindo recursos fósseis, como materiais derivados do petróleo, e alinhando-se aos princípios da bioeconomia. Assim, a viabilidade do uso desse óleo em conjunto com RAP é determinada por avaliações sob aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

A avaliação ambiental de misturas asfálticas recicladas é fundamental para quantificar os impactos nas etapas de produção, construção, manutenção e reabilitação. Isso fomenta a adoção sustentável desses materiais (Costa, 2023). Mantalovas e Di Mino (2020), Melo Neto *et al.* (2022) e Costa *et al.* (2024) adaptaram o Índice de Circularidade do Material (ICM) para avaliar o potencial circular de misturas asfálticas recicladas. Os autores verificaram que a

circularidade medida por este indicador está diretamente associada a um desempenho mecânico favorável e a uma maior proporção de materiais residuais na composição das misturas.

A viabilidade do uso de misturas asfálticas alternativas requer análises abrangentes a respeito do potencial de circularidade dentro da economia circular. No entanto, atualmente, existe uma lacuna quanto à padronização de um índice que mensure a circularidade dessas misturas e que possa ser integrado a análises ambientais como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de misturas asfálticas, dificultando a determinação da viabilidade de incorporar novos materiais sustentáveis no ciclo de produção de misturas asfálticas recicladas (Zhao; Yang, 2023).

No contexto da pavimentação asfáltica, ainda há uma lacuna quanto aos efeitos físicos, químicos e reológicos do óleo de babaçu em ligantes asfálticos virgens e envelhecidos, bem como à sua influência no desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas com altos teores de RAP (>50%). As limitações dos procedimentos laboratoriais para simulação do envelhecimento a longo prazo dos ligantes asfálticos impõem restrições às análises técnicas mais aprofundadas sobre o desempenho de aditivos, dificultando a validação dos seus efeitos ao longo da vida útil dos pavimentos. Nesse contexto, torna-se imprescindível o desenvolvimento e a adoção de metodologias adaptadas que representem de forma fidedigna as condições de envelhecimento em serviço. Além disso, a ausência de estudos sobre os impactos econômicos e ambientais limita o processo de tomada de decisão por parte dos gestores públicos e técnicos, especialmente em análises comparativas entre diferentes tipos de misturas asfálticas. Diante desse cenário, é imprescindível a adoção de uma abordagem holística que inclua, além da avaliação laboratorial do desempenho mecânico, análises mecanicistas por meio de modelagens, estudos de viabilidade econômica e avaliação de impactos ambientais, considerando aspectos como a circularidade e a emissão de CO₂ no processo de produção. Essas análises devem estar alinhadas a cenários realistas de projetos rodoviários para subsidiar decisões técnicas mais robustas e sustentáveis no setor de infraestrutura viária.

Portanto, este estudo investigou o desempenho técnico do óleo de babaçu incorporado em diferentes teores (1% a 12%) a ligantes asfálticos virgens, envelhecidos em laboratório por métodos de curto e longo prazo, bem como recuperados de RAP, por meio de análises físicas,

químicas e reológicas. A investigação técnica foi ampliada para uma abordagem em nível macro, contemplando a avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas com diferentes teores de RAP (0%, 15%, 56%, 63% e 70%) e a eficácia do uso de ligante modificado com óleo de babaçu no rejuvenescimento dessas misturas. Para tal, foram conduzidas análises mecanicistas de pavimentos flexíveis, considerando variações na camada de revestimento asfáltico em função da composição da mistura e seus efeitos sobre a demanda de espessura e deflexões de tração.

Com o objetivo de viabilizar tecnicamente e economicamente o uso das misturas analisadas, realizaram-se avaliações de custo de produção por quilômetro de rodovia e mensuração da circularidade por meio do Índice de Circularidade do Material (ICM), proposto pela Fundação *Ellen MacArthur* e adaptado neste estudo por meio de diferentes abordagens no cálculo do fator de utilidade. Por fim, com o intuito de suprir a lacuna existente na literatura quanto à inexistência de um índice que integre múltiplas dimensões – entrada de materiais residuais, desempenho mecânico, custo e emissões de poluentes –, foi desenvolvido o Índice Integrado de Circularidade e Sustentabilidade para Misturas Asfálticas Recicladas (IICS_{MAR}), o qual incorpora dados de ICM, custo de produção e pegada de carbono por quilômetro de rodovia, apresentando-se como uma ferramenta holística e inovadora de apoio à tomada de decisão em projetos sustentáveis de pavimentação.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial do óleo de babaçu como agente rejuvenescedor em misturas asfálticas recicladas, com base nas características físicas, reológicas, químicas e mecânicas, incluindo análises econômicas e ambientais.

1.1.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (i) Investigar os efeitos físicos, químicos e reológicos causados pela modificação do ligante asfáltico virgem e envelhecido com óleo de babaçu.
- (ii) Avaliar os efeitos do envelhecimento a curto e longo prazo de ligantes asfálticos modificados com óleo de babaçu.
- (iii) Verificar o potencial rejuvenescedor do óleo de babaçu em ligantes recuperados de RAPs distintos por meio de ensaios químicos e reológicos.
- (iv) Analisar os impactos da incorporação de teores acima de 50% de RAP e do óleo de babaçu nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas recicladas.
- (v) Avaliar os efeitos da incorporação de RAP e óleo de babaçu no dimensionamento da camada de revestimento asfáltico e no desempenho mecânico do pavimento flexível.
- (vi) Analisar o impacto econômico das misturas asfálticas recicladas propostas com uma mistura asfáltica convencional.
- (vii) Determinar a viabilidade dessas misturas sob a perspectiva da economia circular por meio da determinação de um índice integrado de circularidade e sustentabilidade incluindo custos de produção e pegada de carbono.

1.2. PREMISSAS E HIPÓTESES

Este estudo fundamenta-se em premissas e hipóteses respaldadas pela revisão da literatura de artigos científicos:

1.2.1. PREMISSAS

- (i) A incorporação do óleo de babaçu será um eficiente redutor de viscosidade tanto para ligantes asfálticos classificados com penetração 50/70 quanto para ligantes asfálticos envelhecidos.
- (ii) A variabilidade no teor de RAP e teor de óleo de babaçu influenciará os resultados de desempenho mecânico, convergindo para um comportamento padrão.

- (iii) Pelo menos 70% do ligante asfáltico presente no RAP interagirá de forma significativa com o ligante virgem modificado por óleo de babaçu.
- (iv) O óleo de babaçu atuará como um mitigador de rigidez acarretada pela adição de RAP nas misturas recicladas.

1.2.2. HIPÓTESES

- (i) A adição do óleo de babaçu permitirá a incorporação de maiores teores de RAP em misturas recicladas.
- (ii) As misturas asfálticas recicladas com óleo de babaçu apresentarão desempenho mecânico superior em comparação com misturas convencionais.
- (iii) Misturas recicladas com o óleo de babaçu exibirão menor grau de rigidez à medida que a proporção de óleo utilizada aumenta.
- (iv) A utilização do RAP contribuirá para um menor custo de produção das misturas asfálticas.
- (v) Misturas asfálticas recicladas com óleo de babaçu apresentarão maior circularidade que a mistura asfáltica convencional.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA TESE

A presente tese está organizada em capítulos para sistematizar e segmentar o trabalho de acordo com os tópicos abordados. O primeiro e segundo capítulos apresentam a introdução e o referencial teórico sobre o tema da pesquisa, respectivamente. Subsequentemente, são apresentados capítulos que descrevem cada análise desenvolvida no estudo, incluindo as metodologias de avaliação utilizadas, os resultados obtidos e as respectivas considerações finais. Ao final, um capítulo de conclusões resume os principais achados da tese. Assim, este trabalho é composto pelos seguintes capítulos:

- (i) Capítulo 1: Introdução;
- (ii) Capítulo 2: Revisão Bibliográfica;

- (iii) Capítulo 3: Investigação Física, Química e Reológica de Ligantes Asfálticos com Óleo de Babaçu;
- (iv) Capítulo 4: Avaliação Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas com Óleo de Babaçu;
- (v) Capítulo 5: Análise Econômica de Misturas Asfálticas Recicladas com Óleo de Babaçu;
- (vi) Capítulo 6: Avaliação Integrada de Circularidade e Sustentabilidade de Misturas Asfálticas Recicladas com Óleo de Babaçu;
- (vii) Capítulo 7: Conclusões.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentadas informações relevantes sobre os temas desta pesquisa. Inicialmente, a análise aborda o contexto das misturas asfálticas recicladas, destacando o uso do *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). Em seguida, são explorados os efeitos de agentes de reciclagem e o potencial uso de óleos biológicos como aditivos nas misturas recicladas. Além disso, são discutidos protocolos de envelhecimento a curto e longo prazo de materiais asfálticos. Também é realizada uma análise abrangente da economia circular no contexto das misturas asfálticas. Por fim, o capítulo apresenta perspectivas sobre a bioeconomia e sua relação com o óleo de babaçu.

2.1. MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

Na reciclagem de pavimentos asfálticos, os resíduos asfálticos são conhecidos como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) e podem ser utilizados na produção de novas misturas, frequentemente referidas como misturas asfálticas recicladas e são aplicadas como camada de revestimento. Os componentes essenciais dessas misturas recicladas consistem nos RAPs, os quais podem ser empregados em diferentes proporções, até mesmo em sua forma integral, conforme investigado por Beserra Costa *et al.* (2023a) na produção de misturas com 100% RAP.

A utilização do RAP na produção de novas misturas asfálticas oferece duas vantagens cruciais: a redução dos custos de construção de pavimentos asfálticos e os benefícios ambientais decorrentes da diminuição da demanda por recursos não renováveis, tais como o ligante asfáltico e os agregados. Essa abordagem se estabelece como uma das alternativas mais apropriadas para promover a sustentabilidade no setor (Anthonissen; Van den bergh; Braet, 2016; Chen *et al.*, 2020; Chiu; Hsu; Yang, 2008; Ding *et al.*, 2019; Huang; Shu; Vukosavljevic, 2011). A incorporação do RAP tem possibilitado a redução dos resíduos

gerados nos processos de reabilitação de pavimentos, fomentando a economia circular e gerando benefícios econômicos e ambientais significativos (Sanchez-Alonso *et al.*, 2011; Vandewalle *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2015).

A pesquisa relacionada à reciclagem de resíduos provenientes de pavimentos asfálticos tem emergido como uma temática de relevância inegável na comunidade acadêmica nos últimos anos. Isso é atribuído ao avanço do desenvolvimento sustentável dos recursos, combinada com a elevação dos custos dos ligantes asfálticos e a crescente escassez de agregados de alta qualidade (Li, Mingchen *et al.*, 2022; Ma *et al.*, 2020, 2021).

A depender das condições de temperatura durante o processamento e das exigências locais, a tecnologia de reciclagem de resíduos provenientes de pavimentos asfálticos se subdivide em quatro categorias principais: reciclagem à quente no local, reciclagem a frio no local, reciclagem em usinas centrais à quente e reciclagem em usinas centrais a frio (Xiao *et al.*, 2018). Dentre essas abordagens, a reciclagem em usinas centrais à quente obteve proeminência devido à sua ampla aplicabilidade, investimento em equipamentos mais acessível e promissora *performance* (Zhang *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2020). Entretanto, devido às limitações relacionadas ao desempenho das misturas asfálticas recicladas à quente produzidas em usinas centrais, a inclusão de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) geralmente é controlada a um limite de 30% em projetos práticos (Lo Presti *et al.*, 2016; Xie *et al.*, 2019). Esse controle limita a eficiência na utilização do RAP.

Uma série de fatores exerce influência sobre a adição do RAP em misturas asfálticas recicladas à quente, sendo um deles o grau de mistura (DOB, do inglês *Degree of Blending*) entre ligantes virgens e RAP (Al-Saffar *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2021). Durante o processo de fabricação das misturas asfálticas recicladas à quente, os ligantes asfálticos RAP, que estão presentes na superfície dos agregados RAP, gradualmente se mesclam com os ligantes asfálticos virgens (Xing *et al.*, 2023).

Atualmente, três suposições predominantes delineiam a condição de mistura entre ligantes asfálticos virgens e o pavimento asfáltico recuperado (RAP) em misturas asfálticas recicladas à quente (Abdalhameed; Abd, 2021; Rathore; Zaumanis, 2020): (i) a suposição da “pedra negra”, que parte do pressuposto de que todos os ligantes asfálticos RAP não se misturam com os ligantes asfálticos virgens, por serem considerados equivalentes a rocha negra; (ii) a suposição de mistura completa, que sustenta que os ligantes asfálticos virgens e

todos os ligantes asfálticos RAP podem ser uniformemente misturados, agindo como adesivos homogêneos na mistura; (iii) a hipótese de mistura parcial, que considera que uma proporção específica dos ligantes asfálticos RAP se mescla com os ligantes asfálticos virgens.

No contexto do projeto atual de misturas asfálticas recicladas à quente, a abordagem da suposição de mistura completa tem sido a mais utilizada para a elaboração de misturas asfálticas recicladas (Xing *et al.*, 2023). Entretanto, alguns estudos indicam que a mistura completa entre ligantes asfálticos virgens e RAP é uma ocorrência rara na prática, especialmente em relação às misturas asfálticas recicladas à quente com elevado teor de RAP (Antunes; Neves; Freire, 2021; Sharifi *et al.*, 2019).

Uma análise estatística conduzida por McDaniel e Anderson (2001) estudou a condição de mistura entre ligantes asfálticos virgens e RAP em 66 diferentes formulações de misturas asfálticas recicladas. Os resultados indicaram que a mistura parcial era a ocorrência predominante em tais misturas asfálticas recicladas. Este cenário implica que as misturas asfálticas recicladas, projetadas com base na suposição de mistura completa, frequentemente resultavam em teores de ligante asfáltico mais baixos do que o necessário, o que por sua vez afetava negativamente o desempenho ao longo de sua vida útil. Abd, Al-khalid e Akhtar (2018) verificaram uma interface frágil na junção entre o ligante asfáltico virgem e o RAP na mistura asfáltica reciclada, resultado do envelhecimento incompleto dos ligantes asfálticos reciclados, os quais não se integravam plenamente com os ligantes asfálticos virgens.

Mullapudi, Aparna Noojilla e Reddy (2020) verificaram que fissuras finas tendem a se desenvolver na camada intermediária de baixa resistência das misturas asfálticas recicladas, especialmente sob as repetidas cargas veiculares, o que tem o efeito de encurtar a vida útil em fadiga das pavimentações recicladas. Paralelamente, Coffey *et al.* (2013) conduziram uma série abrangente de ensaios mecânicos e registraram que a capacidade de resistência à fissuração por fadiga das misturas asfálticas recicladas era reduzida quando o grau de mistura (DOB) na mistura caía abaixo do patamar de 85%.

Li *et al.* (2022) identificaram uma correlação significativa (coeficiente de correlação de Pearson acima de 0,7), entre o grau de mistura (DOB) entre ligantes asfálticos virgens e pavimento asfáltico recuperado (RAP) e a resistência à fissuração em baixas temperaturas. De acordo com suas descobertas, um DOB mais elevado está associado a um desempenho superior em baixas temperaturas nas misturas asfálticas recicladas, conforme avaliado por

meio do teste de flexão semicircular (SCB). Portanto, a determinação precisa do DOB nas misturas asfálticas recicladas à quente assume um papel crítico na compreensão dos mecanismos de dano envolvidos e no desenvolvimento de misturas asfálticas recicladas de alto desempenho.

2.1.2. AGENTES DE RECICLAGEM EM MISTURAS RECICLADAS

Nos últimos anos, tem se observado estudos que propõem aumento do teor de material asfáltico reciclado em misturas recicladas (de Medeiros Melo Neto *et al.*, 2022; Beserra Costa *et al.*, 2023a; da Costa *et al.*, 2024), tornando-se uma prática comum projetar misturas contendo RAP em quantidades de 30% ou até mesmo superiores (McDaniel; Anderson, 2001). À medida que esses teores reciclados mais elevados são incorporados, torna-se evidente que o efeito do material reciclado começa a exercer um impacto discernível sobre o comportamento dessas misturas asfálticas, provocando alterações no desempenho do pavimento. Esse fenômeno pode levar a uma redução de desempenho, tanto dentro quanto além de um limite específico de dosagem, caso não sejam adotadas medidas adequadas, como a incorporação de agentes rejuvenescedores e agentes de reciclagem (Tarsi; Tataranni; Sangiorgi, 2020; Zaumanis; Mallick; Frank, 2013).

Os agentes de reciclagem (ARs) têm sido empregados com a finalidade de ampliar o ponto de equilíbrio e/ou proporcionar vantagens econômicas, abrangendo tanto o desempenho quanto a relação custo-benefício, além de minimizar os impactos ambientais. A principal meta do uso de ARs reside na restauração das propriedades viscoelásticas dos materiais reciclados, permitindo sua reutilização na construção de pavimentos sem comprometer o desempenho a curto ou longo prazo.

A utilização de RAP apresenta benefícios consideráveis. Esses benefícios incluem a redução dos custos de produção, a conservação de recursos naturais e a diminuição da demanda por espaço em aterros. Além disso, há benefícios ambientais associados à sustentabilidade. No entanto, é de suma importância que essas misturas sejam produzidas com um desempenho promissor. Isso é necessário para garantir a durabilidade do pavimento e

reduzir os custos de manutenção. Também assegura a viabilidade de incorporação de maiores quantidades de RAP (Gulzar *et al.*, 2023).

Atualmente, o conhecimento científico referente à seleção e utilização de agentes de reciclagem (ARs) em pavimentos asfálticos ainda é limitado, e há uma necessidade premente de desenvolver metodologias robustas que estabeleçam critérios de limiar e métricas de desempenho a fim de facilitar sua aplicação de forma consistente. Como resposta a essa necessidade, em 2014, o Projeto NCHRP 09–58 foi comissionado com o propósito de investigar os impactos dos ARs em misturas asfálticas contendo elevados teores de materiais asfálticos reciclados. Ao final de suas pesquisas, o projeto recomendou a adoção de uma prática padrão pela AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) para a caracterização de misturas asfálticas contendo alto teor de materiais reciclados, incorporando materiais reciclados em ligantes e conduzindo testes específicos de mistura asfáltica (Epps *et al.*, 2020).

Ao longo dos anos, à medida que o uso de agentes de reciclagem (ARs) aumentou, foram feitas tentativas para classificá-los. Estes sistemas de classificação se basearam em diversos critérios, tais como a origem do AR, suas propriedades físicas, suas características reológicas e outros parâmetros relevantes. Com a crescente diversidade de ARs disponíveis no mercado, a definição de critérios adequados para seleção, diferenciação e classificação tornou-se um desafio, a menos que os fornecedores disponibilizem informações detalhadas ou que testes e análises apropriados sejam conduzidos no AR em questão (Kaseer; Martin; Arámbula-Mercado, 2019).

Observou-se que a eficácia dos agentes de reciclagem (ARs) tende a diminuir à medida que os ligantes reciclados misturados e as misturas asfálticas oxidam ao longo do tempo. A hipótese aponta para as possíveis alterações químicas que ocorrem nos próprios materiais asfálticos reciclados (RAs), as quais podem afetar adversamente o poder dispersivo da fase maltênica. Em um estudo recente, foram documentadas alterações substanciais nos óleos de base biológica após um período de envelhecimento em laboratório, enquanto os óleos à base de petróleo apresentaram poucas ou nenhuma alteração durante o processo de envelhecimento (Xu *et al.*, 2022). As mudanças que ocorrem nos ARs devido ao envelhecimento podem ou não influenciar suas capacidades de rejuvenescimento.

Xu *et al.* (2022) conduziram uma avaliação abrangente das características reológicas dos agentes de reciclagem (ARs) e de sua resistência ao envelhecimento, como parte dos ligantes asfálticos, utilizando um reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) e medições de viscosidade rotacional. Os resultados revelaram que certos ARs, incluindo óleos de base biológica, passaram por notáveis alterações reológicas e químicas após o envelhecimento pelo método PAV (*Pressure Aging Vessel*) de 20 e 40 horas, enquanto outros ARs, como os óleos parafínicos, exibiram pouca ou nenhuma alteração após o envelhecimento. Essas mudanças nos ARs refletiram-se nas misturas de ligantes reciclados, nas quais o envelhecimento seguiu padrões correspondentes às mudanças nos próprios ARs.

Adicionalmente, os pesquisadores concluíram que a resistência ao envelhecimento das misturas de ligantes reciclados não depende exclusivamente do tipo de AR, mas também da porcentagem utilizada. Entretanto, essa descoberta é considerada preliminar e a pesquisa dos autores reconhece a necessidade de realizar estudos adicionais antes que uma compreensão completa da oxidação dos ARs por si só seja alcançada (Abdelaziz *et al.*, 2022; Epps *et al.*, 2020).

Os pesquisadores envolvidos no Projeto NCHRP 09–58 conduziram um estudo abordando as características de envelhecimento dos agentes de reciclagem (ARs) de forma isolada. Eles empregaram medições de viscosidade complexa a 15 °C e 10 rad/s, utilizando uma geometria de placa paralela de 50 mm, em três condições de envelhecimento distintas, a saber, (i) não envelhecido, (ii) submetido ao RTFO (*Rolling Thin Film Oven*) e PAV (*Pressure Aging Vessel*) por 20 horas e (iii) RTFO e PAV por 40 horas. Para avaliar a sensibilidade ao envelhecimento, os pesquisadores empregaram um índice de envelhecimento, calculado pela relação entre a viscosidade complexa em uma condição envelhecida e a viscosidade complexa na condição não envelhecida. Os resultados indicaram que os ARs à base de petróleo exibiram um índice de envelhecimento mais baixo, em virtude de sua natureza quimicamente estável, ao passo que os ARs de base biológica apresentaram um índice de envelhecimento mais elevado, devido à presença de ligações duplas reativas em sua composição (Gulzar *et al.*, 2023).

Gulzar *et al.* (2023) apontam que a presença de antioxidantes naturais nos ligantes asfálticos, tais como fenóis, pode influenciar o comportamento das misturas de ligantes reciclados de forma distinta em relação aos ARs isoladamente. Importante ressaltar que esses

antioxidantes não suprimem necessariamente os mecanismos de oxidação no próprio ligante asfáltico, mas podem desempenhar um papel na proteção das ligações duplas reativas encontradas nos ARs de base biológica.

Em última análise, a pesquisa chegou à conclusão de que, para obter uma compreensão abrangente do papel dos agentes de reciclagem (ARs) nas misturas de ligantes reciclados, é fundamental estudá-los como parte integrante dessas misturas e não de forma isolada. Isso permite obter o fenômeno real que ocorre nas misturas de ligantes reciclados (Gulzar *et al.*, 2023).

2.1.2.1. AGENTES DE RECICLAGEM BIOLÓGICOS

Nas pesquisas relacionadas aos rejuvenescedores asfálticos de origem biológica, as fontes podem ser aproximadamente agrupadas em quatro categorias principais: vegetais (Neto *et al.*, 2022), animais (Fang *et al.*, 2021), algas (Vassilev *et al.*, 2010) e microrganismos (Banat, 1995).

Com base no tipo de vegetação de origem, os rejuvenescedores de origem vegetal podem ser subcategorizados em duas principais classes: plantas herbáceas (Easterly; Burnham, 1996) e plantas lenhosas (McKendry, 2002). Biomassa herbácea é derivada de plantas que possuem caules não lenhosos. Os óleos herbáceos amplamente empregados incluem óleo de soja, óleo de milho (de Medeiros Melo Neto *et al.*, 2022; Vassilev *et al.*, 2010), óleo de amendoim, óleo de colza, óleo de gergelim (Tursi, 2019), óleo de girassol, óleo de semente de algodão e óleo de linhaça (Darmawan; Aziz, 2021; Silva *et al.*, 2022).

A biomassa lenhosa engloba árvores, raízes residuais das camadas superficiais e subterrâneas, cascas e folhas de arbustos lenhosos. Entre os óleos vegetais lenhosos frequentemente empregados estão o óleo de camélia, o óleo de semente de peônia (Easterly; Burnham, 1996), o óleo de palma, o óleo de noz, o óleo de coco (Vassilev *et al.*, 2010), o azeite, entre outros (McKendry, 2002). Os rejuvenescedores de origem vegetal utilizados para melhorar o desempenho de materiais asfálticos reciclados (RAP) geralmente são derivados desses óleos, e podem incluir subprodutos da extração de biodiesel desses óleos, bem como óleo de cozinha residual, entre outros (de Medeiros Melo Neto *et al.*, 2022, 2023a).

Os rejuvenescedores de origem animal geralmente são obtidos a partir de fontes como gorduras, fezes de animais (Fini; Yang; Xiu, 2010) e ossos (Hung *et al.*, 2017). Devido ao seu alto teor de lipídios e nitrogênio, essas substâncias têm a capacidade de despolimerizar as estruturas moleculares do ligante asfáltico envelhecido. Além disso, as algas, que contêm abundantes lipídios e proteínas, produzem bio-óleo durante a pirólise, o qual pode ser utilizado como rejuvenescedor para combater o envelhecimento do ligante asfáltico (Rodolfi *et al.*, 2009). Entre os rejuvenescedores de origem de algas frequentemente empregados estão Chlorophyta (Dandamudi *et al.*, 2019; Jin *et al.*, 2017), Rhodophyta (Harman-Ware *et al.*, 2013) e Phaeophyta (Guo *et al.*, 2015; Tursi, 2019).

Dentre os microrganismos capazes de degradar hidrocarbonetos de petróleo, a maioria pertence ao reino das bactérias, incluindo *Pseudomonas* (Gao *et al.*, 2017), *Acinetobacter* (Zhang *et al.*, 2006) e *Bacillus* (Ghosal *et al.*, 2016). Uma vez que o ligante asfáltico é um subproduto do petróleo e composto por uma variedade de hidrocarbonetos, é plausível que esses microrganismos possam contribuir para a regeneração do ligante.

2.1.2.1.1. ÓLEOS VEGETAIS

Pesquisadores (de Medeiros Melo Neto *et al.*, 2023a, 2023c; da Costa *et al.*, 2024) conduziram análises da composição química de rejuvenescedores de origem vegetal provenientes de várias fontes. Os óleos vegetais, em sua maioria, consistem em ácidos graxos de cadeia longa, dotados de grupos de ácido carboxílico (He *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2018).

Esses ácidos graxos insaturados podem ser categorizados em ácidos graxos monoinsaturados e ácidos graxos poli-insaturados. Notavelmente, os rejuvenescedores derivados de óleos vegetais são ricos em ácido oleico (um ácido graxo monoinsaturado) e ácido linoleico (um ácido graxo poli-insaturado), que representam as principais componentes desses materiais (Alattieh *et al.*, 2020).

Os ácidos graxos insaturados de origem vegetal possuem uma estrutura molecular de hidrocarboneto semelhante ao ligante envelhecido, o que facilita a fusão entre eles. Adicionalmente, esses ácidos graxos apresentam coeficientes de difusão e forças motrizes superiores em comparação com os componentes leves do ligante asfáltico. Isso permite que

eles resistam ao agrupamento molecular durante o processo de envelhecimento e complementem os componentes leves ausentes no ligante asfáltico, restaurando assim as propriedades reológicas do ligante envelhecido (Sun; Zhou, 2018).

Su *et al.* (2015) realizaram uma análise da difusão dinâmica do óleo de cozinha residual (WCO) no ligante envelhecido por meio de invólucros de microcápsulas, observando o processo sob um microscópio de fluorescência. O fluxo do óleo de cozinha residual nas microcápsulas ao longo do tempo serviu como o principal impulsionador desse processo. As moléculas dos rejuvenescedores gradualmente se difundiram no ligante asfáltico, impulsionadas pela diferença de concentração entre o interior e o exterior das microcápsulas (Su *et al.*, 2015; Su; Schlangen, 2012). Este mecanismo de difusão é semelhante ao observado com rejuvenescedores de origem petrolífera, no entanto, os rejuvenescedores de origem vegetal apresentam vantagens em termos de economia e sustentabilidade ambiental. Importante destacar que esse processo de difusão desempenha um papel essencial na recuperação do *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) com rejuvenescedores, e não envolve reações químicas (Bilema *et al.*, 2021; Cavalli *et al.*, 2018; Lv *et al.*, 2021).

Por um lado, os componentes leves presentes no óleo de cozinha residual suplementam as perdas de componentes de pequeno peso molecular no ligante asfáltico envelhecido (Gong *et al.*, 2016). Por outro lado, o óleo de cozinha residual se mescla com o ligante envelhecido, resultando na suavização do ligante asfáltico e na restauração de seu desempenho (Xu; Wang; Sun, 2018; Zadshir; Hosseinneshad; Fini, 2019). Pesquisadores conduziram simulações do comportamento de difusão de várias moléculas rejuvenescedoras no ligante asfáltico por meio de dinâmica molecular. Essas simulações consideram as características estruturais dessas moléculas e a energia potencial intermolecular total (energia potencial de van der Waals), revelando que a estrutura molecular dos rejuvenescedores é comparável à dos componentes leves do ligante asfáltico, permitindo sua difusão eficiente (Yi *et al.*, 2023).

A densidade dos alcanos de cadeia é inferior à do ligante asfáltico, o que resulta em uma atração de van der Waals mais pronunciada no ligante regenerado, estimulando assim o processo de difusão. No caso de moléculas de cadeia com anéis de benzeno, a energia potencial de van der Waals no sistema é consideravelmente elevada; consequentemente, as outras moléculas do rejuvenescedor exercem uma influência mais significativa sobre a

molécula alvo em comparação com os hidrocarbonetos da cadeia. Isso, por sua vez, resulta em uma taxa de difusão mais reduzida (Xu *et al.*, 2019).

Zhang *et al.* (2019) conduziram uma análise do grau de restauração do ligante asfáltico, considerando os grupos funcionais. A introdução de um regenerador de óleo vegetal recuperou os níveis originais dos grupos carbonila e sulfóxido no ligante envelhecido. De acordo com Cavalli *et al.* (2018), os rejuvenescedores têm o potencial de influenciar a morfologia, frações de saturados e aromáticos, dos ligantes RAP antes e após o envelhecimento, impactando, assim, na formação das estruturas celulares.

Há uma escassez de pesquisas abordando a resistência à umidade e ao envelhecimento em misturas asfálticas recuperadas com o uso de óleo vegetal. Alguns estudos indicaram que misturas asfálticas regeneradas com óleo vegetal residual tendem a apresentar uma resistência inadequada aos danos causados pela água (Majidifard; Tabatabaee; Buttlar, 2019; Xie *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2020). Esse fenômeno está associado principalmente ao caráter ácido do rejuvenescedor, o qual pode comprometer a adesão do ligante ao agregado, resultando em uma redução na capacidade de resistência da mistura à umidade (Zaumanis *et al.*, 2014). Entretanto, Melo Neto *et al.* (2022) e Torres *et al.* (2022) observaram comportamento distinto ao utilizar o ácido graxo da borra do óleo de soja e o óleo de cozinha residual como agente rejuvenescedor, respectivamente, para misturas asfálticas recicladas com teor de RAP acima de 30%. Os autores observaram valores de resistência retida à tração superior a 80%, limite estabelecido pela metodologia *Superior Performance Asphalt Pavements* (SUPERPAVE).

Por outro lado, é amplamente reconhecido que as misturas asfálticas regeneradas com óleo vegetal têm uma resistência ao envelhecimento limitada. Isso se deve em grande parte à alta viscosidade e ao teor elevado de água presentes nos óleos vegetais. A presença de carboidratos resulta na formação de óleos vegetais complexos por meio de processos de pirólise, levando à inclusão significativa de compostos ricos em oxigênio, como éteres e álcoois, na mistura. Estes componentes são particularmente suscetíveis ao envelhecimento oxidativo, contribuindo para a deterioração prematura da resistência ao envelhecimento nas misturas asfálticas regeneradas com óleo vegetal. É importante observar que a literatura disponível cobre uma parte considerável das pesquisas realizadas na China e em outros países sobre o uso de rejuvenescedores de origem vegetal. Entretanto, ainda persistem desafios a serem superados na busca pela restauração eficaz do desempenho em misturas de resíduos

usando rejuvenescedores à base de óleos vegetais, e isso deixa um amplo campo para futuras investigações (Yi *et al.*, 2023).

2.1.2.1.1.1. ÓLEO DE BABAÇU

O termo "Babaçu" é usado de forma genérica para se referir a palmeiras oleaginosas pertencentes à família *Palmae* e aos gêneros *Orbignya* e *Attalea*. O primeiro gênero engloba principalmente espécies nativas da região norte e nordeste do Brasil, como o Maranhão, Piauí, Pará e Tocantins. Algumas das espécies incluem *Orbignya phalerata* Mart. (babaçu verdadeiro), *Orbignya eichleri* Drude (piaçava), *Orbignya teixeirana* Bondar (perinão) e *Orbignya microcarpa* Martius. O segundo gênero compreende espécies encontradas principalmente nos estados de Goiás, Minas Gerais e Bahia, como *Attalea oleifera* Barb. Rodr. (catolé-de-pernambuco) e *Attalea pindobassu* Bondar (pindobaçu). Dentre essas espécies, *Orbignya phalerata* é a mais amplamente distribuída, com maior variação morfológica e relevância econômica. Ela ocupa extensas áreas no Brasil, na Bolívia e no Suriname (Zylbersztajn *et al.*, 2000a). O Babaçu é nativo da região de transição entre o cerrado e as florestas abertas do sul da Amazônia, onde se estabeleceu em áreas impactadas pela atividade humana e formou populações oligárquicas, podendo atingir até 20 metros de altura (Clement; Lleras; Leeuwen, 2005).

Uma característica distintiva da verdadeira palmeira de Babaçu é a disposição de suas folhas, que formam ângulos superiores a 250 graus em relação ao horizonte, tornando-a facilmente identificável em comparação com outras palmeiras na região. Além disso, o Babaçu tem diversas aplicações práticas, abrangendo a utilização de seu tronco, folhas e frutos (Teixeira, 2002).

Em áreas densamente cobertas por babaçu, a biomassa total atinge 69,1 toneladas de peso seco por hectare. A produção anual de folhas alcança 16,8 toneladas de peso seco por hectare. Essa alta produção de folhas do babaçu oferece aos agricultores a quantidade necessária de combustível para apoiar suas práticas agrícolas itinerantes. Para permitir o cultivo intercalado de culturas anuais junto ao babaçu no sistema itinerante, algumas palmeiras são removidas. Isso, além de criar condições para o crescimento das culturas,

garante que uma variedade de produtos essenciais para a subsistência e comercialização, derivados do babaçu, possa ser obtida durante o período de descanso. Em densidades que variam de 141 a 160 palmeiras por hectare em todas as faixas etárias, estima-se que a produtividade máxima alcançada pelos babaçuais na região dos Cocais seja de 2,1 toneladas de coco por hectare (May, 1987).

Por outro lado, Kono (1976), após realizar um levantamento em 1.400 hectares de babaçuais no município de Codó (MA), obteve uma produtividade média de 2,5 toneladas por hectare ao ano. De acordo com Zylbersztajn *et al.* (2000a), a espécie *Orbignya oleifera*, em comparação com *O. phalerata*, é a que apresenta maior produção de frutos. As características anatômicas dessa espécie a tornam mais produtiva, com uma produção de frutos de 5 toneladas por hectare por ano e um teor de amêndoas que varia de 10% a 22% nos frutos.

O óleo da amêndoa é o principal produto obtido do babaçu, representando 65% do peso da amêndoa. Este óleo é utilizado como matéria-prima na fabricação de sabão, glicerina e óleo comestível, sendo posteriormente transformado em margarina. Além disso, a borra residual é aproveitada na produção de ração animal e na extração de óleo comestível (Albiero *et al.*, 2007).

De acordo com Frazão (2001), a produção média de frutos de babaçu atinge 2.400 kg por hectare. Desta produção, 1.780 kg (74%) corresponde à casca externa, 480 kg (20%) ao mesocarpo e 140 kg (6%) às amêndoas. A partir das amêndoas, é possível obter 91 litros de óleo. O processo de extração do óleo a partir da polpa da semente envolve métodos tradicionais, seguido de etapas de neutralização e purificação. O óleo derivado do Babaçu possui uma composição química e características sensoriais semelhantes aos óleos de coco (*Cocos nucifera*) e dendê (*Elaeis guineensis*) (Lopes, 1983).

Adicionalmente, por meio de uma reação de transesterificação com metanol ou etanol, é viável a obtenção de biodiesel, um combustível limpo e renovável adequado para a propulsão de veículos a diesel. A extração de leite e óleo comestível a partir das amêndoas, bem como a produção de farinha de Babaçu a partir da polpa dos frutos (mesocarpo), são práticas comuns. A farinha de Babaçu pode servir como substituto da farinha de mandioca ou como alimento para o gado. Embora as comunidades locais conheçam usos tradicionais na área farmacêutica, a aplicabilidade desses usos carece de pesquisas suficientes para comprovação (Lopes, 1983).

Conforme relatado por Zylbersztajn *et al.* (2000a), o esmagamento dos cocos de babaçu resulta em dois tipos de óleo: um destinado a usos comestíveis e outro com foco na aplicação industrial, conhecido como óleo láurico. O uso do óleo de babaçu para fins comestíveis tem diminuído consistentemente, devido a duas razões principais: a substituição por óleos mais acessíveis e a tendência dos consumidores em optar por óleos e gorduras insaturadas.

A baixa produtividade dos babaçuais está associada a uma série de fatores, dos quais se destacam a presença significativa de plantas não produtivas, o desequilíbrio na proporção de inflorescências masculinas e femininas (5:1) em palmeiras adultas produtivas e a idade das plantas. Em geral, o babaçu requer um período de 10 a 12 anos para iniciar a produção, alcançando sua maturidade produtiva entre 15 e 20 anos (Frazão, 2001; May, 1987).

De acordo com as diretrizes da Embrapa (1984), a produção do babaçu é influenciada por parâmetros climáticos específicos, que incluem: (i) Uma insolação mínima de 2400 horas por ano ou uma radiação total mensal de 360 cal.m^{-2} ; (ii) Evapotranspiração durante o trimestre seco não superior a 280 mm, o qual corresponde a setembro, outubro e novembro. No entanto, acima do paralelo 3° Sul, essa temporada se desloca para junho, julho e agosto. Nas regiões centrais, concentra-se nos meses de julho, agosto e setembro; (iii) Precipitação anual não inferior a 1700 mm; (iv) Umidade adequada na região das raízes, durante o período de maior escassez (3 meses mais secos), que não deve exceder 400 mm; (v) Ventos com velocidade inferior a 3 m/s; e (vi) Preferencialmente, a presença de vales orientados de leste a oeste para maximizar a umidade e as horas de insolação.

Apesar de seu método de exploração ser baseado no extrativismo primário, o babaçu desempenhou um papel significativo na economia do Estado do Maranhão até meados da década de 80. Isso se deve ao fato de o babaçu servir como base para sustentar um parque industrial dedicado à extração de óleo vegetal, criado exclusivamente para processar as amêndoas oleaginosas provenientes de seus frutos (Albiero *et al.*, 2007).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (2017), a amêndoa do babaçu é categorizada como um produto oriundo da sociobiodiversidade, e o estado do Maranhão se destaca como o principal produtor, sendo responsável por 94% da produção total. A agricultura do babaçu faz parte dos Sistemas Agrícolas Tradicionais, no entanto, a cadeia produtiva ainda não se encontra devidamente estruturada, tanto em termos agrícolas quanto de

mercado. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), é essencial direcionar investimentos para tecnologia, qualificação de mão de obra e para a criação de um ambiente de mercado mais favorável ao óleo de babaçu, visando revitalizar a produção e estabelecê-la firmemente no contexto da produção nacional.

Durante as décadas de 60 até o início dos anos 80, esse período foi marcado como o auge da economia babaçueira. Nessa fase, o Estado do Maranhão abrigava 52 empresas de médio e grande porte que produziam óleo destinado ao suprimento de indústrias alimentícias, de higiene e de limpeza, tanto no território nacional quanto no exterior (Herrmann *et al.*, 2001). A partir de 1990, com a liberalização das importações e a globalização da economia mundial, o óleo de babaçu, obtido por meio de um extrativismo primário, passou a enfrentar forte concorrência no mercado nacional de óleos láuricos. O óleo de palmiste, derivado das sementes de dendê e produzido em plantações industriais altamente produtivas nas Filipinas, passou a ser comercializado no mercado brasileiro a preços equivalentes a aproximadamente 70% do valor do óleo de babaçu (Frazão, 2001).

Atualmente, o mercado brasileiro de óleos láuricos desempenha um papel preponderante para o óleo de babaçu. As indústrias que atuam nos setores de higiene, limpeza e cosméticos absorvem aproximadamente 35 mil toneladas de óleo de babaçu bruto a cada ano. Além das aplicações em óleos láuricos, o babaçu vem ganhando relevância para algumas empresas na indústria siderúrgica. Essas empresas têm interesse na utilização do coco carbonizado como fonte de carvão vegetal, substituindo assim o carvão proveniente de florestas nativas (Zylbersztajn *et al.*, 2000a).

A casca do coco, após o devido preparo, se transforma em um eficaz carvão vegetal, que é a única fonte de combustível em várias regiões do nordeste do Brasil. A população local, ciente das riquezas que dispõe, frequentemente se envolve no processo de produção de carvão de babaçu durante a noite. Esse processo envolve a queima lenta em fornos cobertos por folhas e terra, e a fumaça resultante é aproveitada como um eficiente repelente de insetos (BiodieselBR, 2007).

Santos *et al.* (2022) apresentaram a média de dados de importação de óleo de bruto de Babaçu entre os anos de 2008 e 2017. O valor médio foi de 2.988 (US\$) para uma quantidade mássica de 345 kg, gerando um custo unitário de 9,74 (US\$/kg). Entre 2008 e 2017, observou-se um aumento significativo nas publicações científicas relacionadas a espécies

vegetais que servem como fonte de óleo, tanto em âmbito global (aproximadamente 120%) quanto no contexto brasileiro (cerca de 130%). Contudo, é importante ressaltar que, embora tenha ocorrido um crescimento equivalente ao longo desse período em nível mundial e no Brasil, as contribuições científicas do Brasil não correspondem a 10% do total global, mesmo considerando a relevância do Brasil como um dos principais produtores de oleaginosas, conforme abordado anteriormente (Santos *et al.*, 2022).

2.2. ENVELHECIMENTO DE MATERIAIS ASFÁLTICOS

O processo de envelhecimento dos ligantes asfálticos é primariamente desencadeado por duas vias: a volatilização, que provoca a perda de peso, e a oxidação. A exposição desses materiais a fatores ambientais, como a presença de oxigênio, exposição à água, radiação ultravioleta, flutuações de temperatura na superfície da pavimentação e reações químicas com os agregados, desencadeia o processo de envelhecimento. Esse fenômeno leva a alterações na composição química, propriedades físicas e características reológicas dos ligantes. Consequentemente, ocorre a fragilização dos ligantes, comprometendo sua capacidade de suportar as cargas nas misturas asfálticas e, por conseguinte, reduzindo a vida útil do pavimento (Lopes, 2023).

É essencial compreender o processo de envelhecimento dos ligantes asfálticos, pois este desempenha um papel significativo na determinação da vida útil de um pavimento, sendo uma das principais causas de sua deterioração precoce. Esse fenômeno resulta em mudanças no comportamento reológico e na composição química do ligante, conforme relatado por (Zhang *et al.*, 2018).

O envelhecimento provoca um aumento na rigidez do ligante asfáltico ao longo do tempo, manifestado por meio do aumento da viscosidade, o qual está relacionado às temperaturas e ao período de exposição às quais o material está sujeito, conforme discutido por (An *et al.*, 2022). O aumento excessivo da rigidez pode acelerar o surgimento de trincas na mistura asfáltica. No entanto, é importante observar que a atenuação do fenômeno de deformação permanente em rodovias sujeitas a tráfego intenso e variações de temperatura

pode contribuir positivamente para o desempenho mecânico de misturas asfálticas envelhecidas, como argumentado por (Cravo, 2016).

El Beze (2008) identificou alguns fatores que interferem no processo de envelhecimento do pavimento, como a natureza e a espessura do filme de ligante asfáltico. No entanto, o autor destaca que os principais responsáveis pela oxidação do ligante estão associados ao intemperismo e são os seguintes:

(i) Luz: A exposição do ligante à luz desencadeia reações de foto-oxidação, cuja velocidade é influenciada pelo comprimento de onda da radiação e sua intensidade. As reações de foto-oxidação resultam nos mesmos efeitos observados nas reações de oxidação pelo oxigênio, levando à polimerização das resinas em asfaltenos.

(ii) Temperatura: A temperatura desempenha um papel essencial no envelhecimento do ligante, pois promove a evaporação das substâncias mais voláteis e causa variações em sua composição e propriedades reológicas. A elevação da temperatura acelera a difusão do oxigênio e contribui para a energia de ativação nas reações de oxidação. A taxa de oxidação aumenta de forma exponencial com o aumento da temperatura, aproximadamente dobrando a cada 10°C.

(iii) Água: A presença de água, tanto no estado líquido quanto no gasoso, propicia a degradação do ligante e pode solubilizar os produtos resultantes dessa degradação.

(iv) Oxigênio: O oxigênio penetra lentamente na estrutura do pavimento asfáltico por meio de difusão. Em temperaturas muito elevadas, a quantidade de oxigênio presente no ligante asfáltico é reduzida. No entanto, em temperaturas ambiente ou moderadas, o oxigênio se liga quimicamente ao ligante.

O envelhecimento dos ligantes asfálticos pode ser dividido em duas etapas distintas: o envelhecimento a curto prazo (i), que ocorre durante o processo de fabricação, transporte e compactação das misturas asfálticas; e o envelhecimento a longo prazo (ii), que se desenvolve ao longo da vida útil do pavimento (Nascimento, 2016; Takahashi, 2020).

De acordo com Cravo (2016) e as conclusões de Nascimento e Faxina (2017), envelhecimentos significativos ocorrem a curto prazo quando o ligante asfáltico é submetido a altas temperaturas durante o processo de fabricação (Figura 1). Nessa fase inicial de envelhecimento, dois processos ocorrem em paralelo: volatilização e oxidação. A

volatilização é principalmente de natureza física e resulta na perda de componentes voláteis do ligante asfáltico, o que é geralmente avaliado por meio da medição da perda de massa devido às altas temperaturas. Por outro lado, a oxidação é um processo químico mais complexo que afeta o comportamento reológico do ligante asfáltico e é mais desafiador de ser quantificado.

Já durante a vida útil do pavimento, o enrijecimento do ligante ocorre predominantemente devido ao processo oxidativo. À medida que o ligante asfáltico oxida, são gerados os asfaltenos, substâncias com menor solubilidade que adquirem características sólidas. Isso resulta em um aumento da viscosidade e da elasticidade do ligante asfáltico. Os asfaltenos se comportam como materiais que sofrem grandes tensões quando submetidos a deformações e, ao mesmo tempo, não podem aliviar essas tensões através do fluxo, o que torna o revestimento quebradiço e suscetível a trincamentos causados por fadiga e variações térmicas (Woo; Chowdhury; Glover, 2008).

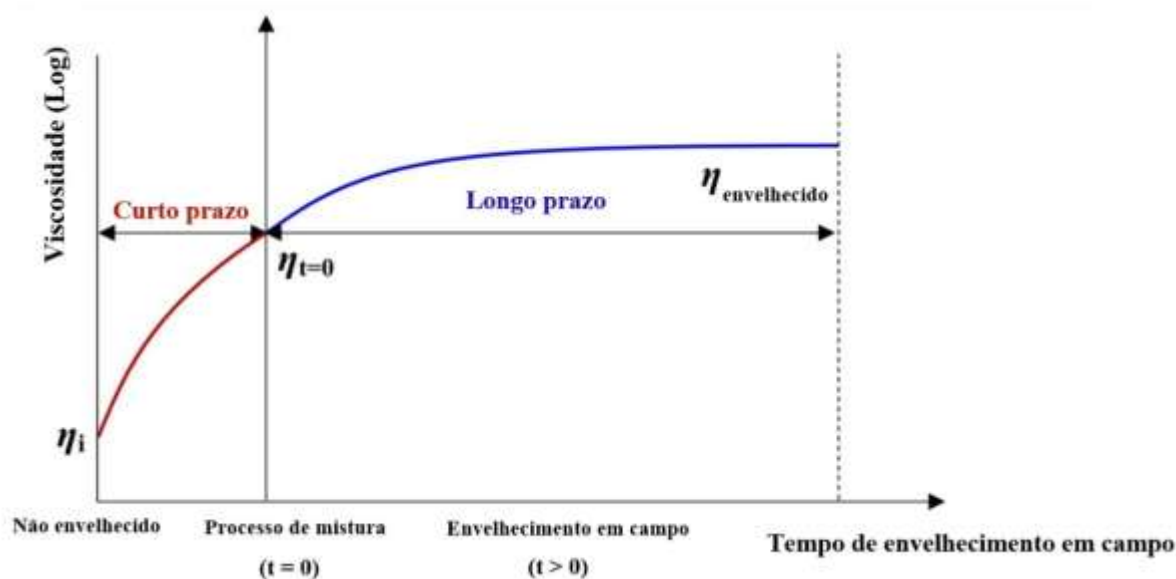


Figura 1 - Evolução do envelhecimento do revestimento asfáltico em termos de viscosidade do ligante (η_i é a viscosidade não envelhecida; $\eta_t = 0$ é a viscosidade de curto prazo envelhecida correspondente à condição de mistura; $\eta_{\text{envelhecido}}$ é a viscosidade envelhecida a longo prazo correspondente à condição em serviço do pavimento).

Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2019).

Devido ao seu impacto nas características reológicas dos ligantes asfálticos, o fenômeno de envelhecimento tem sido amplamente investigado nos últimos anos. O objetivo

dessas pesquisas foi estabelecer critérios de controle que possam ser incorporados às especificações desses materiais (Durrieu; Farcas; Mouillet, 2007; Lu; Isacsson, 2002; Mazzoni *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2008; Yamaguchi *et al.*, 2005; Zeng *et al.*, 2015).

Segundo Lu e Isacsson (2002) os principais fatores intervenientes sobre o envelhecimento dos ligantes asfálticos são características do próprio ligante asfáltico e o seu teor ótimo na mistura asfáltica, a natureza dos agregados minerais e sua composição granulométrica, o volume de vazios da mistura asfáltica, além de fatores relacionados à produção, como as temperaturas e os tempos praticados. Todos estes fatores operam simultaneamente, tornando o envelhecimento dos ligantes asfálticos um fenômeno de difícil quantificação.

Dentre os principais métodos padrão desenvolvidos para simular e acelerar o envelhecimento do ligante asfáltico no laboratório, destacam-se o envelhecimento usando a Estufa de Filme Fino Rotativa (RTFO - *Rolling Thin Film Oven*) e o vaso pressurizado (PAV - *Pressure Aging Vessel*), à curto e longo prazo, respectivamente, que utilizam diferentes combinações de temperatura e pressão de oxigênio (Hofko *et al.*, 2016).

Subbarao Nagabhushanarao e Vijayakumar (2021) conduziram um experimento com o propósito de obter um ligante asfáltico com envelhecimento acelerado a longo prazo, semelhante ao método PAV (*Pressure Aging Vessel*). Este processo envolveu a realização de vários ciclos de envelhecimento RTFO a 163°C, com cada ciclo durando 85 minutos. Inicialmente, os ligantes passaram por 5 ciclos de envelhecimento RTFO a 163°C, com durações de envelhecimento de 85, 170, 255, 340 e 425 minutos, respectivamente. Após a etapa inicial de envelhecimento RTFO (ciclo de 85 minutos), o teste PAV acelerado padrão foi realizado a 100°C por 20 horas no ligante envelhecido a critério de comparação com as amostras envelhecidas com mais de um ciclo de RTFO.

O parâmetro de fadiga foi escolhido para determinar a durabilidade, devido às propriedades viscoelásticas críticas do ligante quando envelhecido a temperaturas intermediárias. Isso ocorre porque os ligantes envelhecidos a longo prazo devem exibir características elásticas apropriadas para resistir à fadiga e evitar fissuras durante a vida útil dos pavimentos. Conforme a especificação estabelecida pela norma SUPERPAVE ASTM D6373 (2021), o uso do resíduo de ligante asfáltico envelhecido acelerado é indicado para

avaliar o parâmetro de fadiga ($G^*\sin\delta \leq 5.000 \text{ kPa}$) (Subbarao Nagabhushanarao; Vijayakumar, 2021).

Portanto, para gerar um ligante asfáltico envelhecido rapidamente utilizando o teste RTFO (ASTM D2872, 2019), tanto para ligantes não modificados quanto para aqueles modificados com estireno-butadieno-estireno (SBS), pode-se optar por tempos mais curtos de RTFO, como 5 horas e 20 minutos, ou 6 horas, como uma alternativa ao teste PAV a 100°C por 20 horas, conforme especificado em ASTM D6521 (2022) (Subbarao Nagabhushanarao; Vijayakumar, 2021). Essa abordagem pode ser particularmente útil em laboratórios que possuem restrições na realização do ensaio PAV, permitindo uma análise mais abrangente do envelhecimento de ligantes asfálticos em curto e longo prazo.

Pesquisas recentes (Ng, 2017; Nuñez; Faxina, 2014) têm se dedicado a avaliar o desempenho de misturas asfálticas em relação ao envelhecimento e à incorporação de modificadores no ligante. Isso ocorre devido às evidências que indicam a influência desses fatores nas propriedades das misturas asfálticas. Ligantes modificados, por exemplo, podem melhorar a resistência da mistura asfáltica contra danos por fadiga, enquanto o envelhecimento do ligante tende a tornar o material mais rígido, reduzindo a vida útil das misturas asfálticas.

No entanto, é importante observar que a maioria dessas investigações se concentra no envelhecimento da fração ligante, sem considerar o esqueleto pétreo da mistura. De acordo com Coutinho (2012) e Freire (2015) os danos por fadiga que afetam a mistura completa geralmente se originam na parte ligante, o que justifica o estudo dessa fração como um passo intermediário para estimar o comportamento final da mistura.

Kim *et al.* (2017) conceberam um processo de envelhecimento de longa duração para misturas asfálticas, o qual foi calibrado e confirmado por meio de uma série de experimentos em laboratório, empregando núcleos retirados de campo, ligantes asfálticos originais e agregados de 18 diversas misturas asfálticas, abrangendo tanto as tradicionais misturas à quente como as misturas mornas modificadas. Essas misturas foram coletadas de nove projetos de campo que refletem uma ampla gama de condições climáticas encontradas nos Estados Unidos e Canadá.

O método proposto pelos autores representa um avanço em relação ao procedimento AASHTO R30, pois estabelece o tempo de envelhecimento em laboratório com base nas características climáticas específicas do local do projeto. Todo o envelhecimento é conduzido em amostras de misturas soltas a 95°C, o que, segundo os autores, proporciona um envelhecimento rápido e uniforme em comparação com amostras compactadas.

Kim *et al.* (2017) destacam que o envelhecimento a 95°C oferece uma redução significativa no tempo de envelhecimento necessário quando comparado aos 85°C indicados na AASHTO R30. Contudo, observou-se que a utilização de temperaturas de envelhecimento de 100°C ou superiores pode introduzir modificações químicas no ligante asfáltico que não estão presentes nos ligantes envelhecidos em condições de campo. O método também leva em consideração a espessura das misturas asfálticas.

Ademais, para facilitar a seleção do tempo de envelhecimento em laboratório, o procedimento proposto oferece uma série de mapas que correlacionam o tempo de envelhecimento em laboratório com 4, 8 e 16 anos de envelhecimento em campo, considerando diferentes profundidades, como 6 mm, 20 mm e 50 mm abaixo da superfície do pavimento.

Nesse contexto, a abordagem dessa metodologia foi investigada no estudo conduzido por Li *et al.* (2020), o qual investigou os efeitos do *Long-Term Oven Aging* (LTOA) em diversas misturas, utilizando diferentes protocolos que variaram em termos de tempo, estado de compactação e temperatura. Os pesquisadores empregaram o ensaio de módulo dinâmico para avaliar o impacto desse processo de envelhecimento, e observaram que a utilização de amostras não compactadas anula o efeito do gradiente térmico, além de conferir maior rigidez às misturas quando comparadas às amostras compactadas.

Além disso, destacaram a eficácia superior do método do Relatório 871 (Kim *et al.*, 2017), uma vez que esse método enrijece o material de maneira mais eficiente do que a norma AASHTO R30. Isso ocorre, em parte, devido ao fato de que a exposição a 95°C promove uma oxidação significativamente mais rápida do que a exposição a 85°C.

No contexto das misturas asfálticas recicladas, compostas tipicamente por materiais envelhecidos a longo prazo (RAP), existem lacunas significativas na pesquisa sobre os efeitos no desempenho mecânico ao aumentar a proporção desses materiais envelhecidos na

composição. Avaliar a durabilidade dessas misturas recicladas com altos teores de RAP é crucial para determinar a viabilidade do conteúdo de RAP e do agente rejuvenescedor selecionado no projeto da camada de pavimentação.

2.3. ECONOMIA CIRCULAR NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A preocupação com as mudanças climáticas e seus impactos é uma realidade global. A atividade humana figura como um dos principais agentes do esgotamento dos recursos naturais, impulsionada pelo crescimento econômico e pelo consequente aumento do consumo energético. Esse acréscimo na demanda por energia contribui direta e indiretamente para o aquecimento global. Entre 1970 e 2017, aproximadamente 2,5 trilhões de toneladas de materiais foram extraídos e utilizados, sendo os países de maior renda responsáveis por cerca de 74% desse consumo excessivo (Hickel *et al.*, 2022). Além disso, mais da metade da população mundial reside em áreas urbanas, que ocupam apenas 3% da superfície terrestre, mas respondem por dois terços do consumo global de energia e 75% das emissões de carbono, segundo a Organização das Nações Unidas (ONU) em 2023.

As cidades concentram as atividades humanas e representam uma interface crítica entre os sistemas naturais e socioeconômicos. O desenvolvimento urbano insustentável tem gerado impactos ambientais e ecológicos significativos (Zhang; Yang; Yu, 2015). A geração de resíduos, um dos principais desafios da urbanização, exige soluções eficazes para mitigar seus efeitos (Galán-Cano *et al.*, 2025). Em 2015, diversos países aderiram ao Acordo de Paris, comprometendo-se a limitar o aquecimento global e alcançar a neutralidade de carbono (Delbeke *et al.*, 2019). Nesse contexto, a Alemanha estabeleceu a *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie* (Estratégia Nacional de Economia Circular), integrando metas e medidas para promover a economia circular e a eficiência de recursos. A Indústria da Construção (IC) foi identificada como um dos setores prioritários para a implementação dessas diretrizes (Federal Environment Ministry, 2023).

A IC apresenta um diagnóstico desfavorável em relação ao uso de recursos, geração de resíduos, emissões de carbono e consumo energético em escala global. Estima-se que o setor consuma aproximadamente 40% dos recursos naturais e seja responsável por 25% dos

resíduos gerados mundialmente (Kaza *et al.*, 2018; Teh; Wiedmann; Moore, 2018). Além disso, a IC ocupa a terceira posição em volume de resíduos gerados, com uma média per capita de 1,68 kg por dia (Kaza *et al.*, 2018). Aproximadamente 35% dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) são destinados a aterros sem tratamento adequado, agravando os impactos ambientais (Menegaki; Damigos, 2018).

Este cenário surge em um contexto global de reaproveitamento de apenas 8,6%, com uma estimativa de perda de 57% do valor total dos materiais, embora haja a possibilidade de revalorização desses materiais (Ossio; Salinas; Hernández, 2023). Adicionalmente, a IC é responsável por 36% do consumo de energia e 37% das emissões de CO₂ relacionadas à energia (Kaza *et al.*, 2018). Essas estatísticas têm motivado a IC a buscar alterações em suas práticas e a redefinir conceitos, como a Construção Circular (CC), visando tornar-se mais sustentável.

Boff (2016) destaca que a sustentabilidade envolve processos e ações voltados à preservação da vida e sua continuidade para as gerações presentes e futuras, abrangendo não apenas os seres humanos, mas toda a comunidade biológica. No contexto da IC, a sustentabilidade é estruturada em três dimensões: (i) preservação ambiental, incluindo resiliência e mitigação de impactos; (ii) equidade e justiça social; e (iii) viabilidade econômica e ganhos financeiros (Vogt; Weber, 2019). No entanto, alcançar a sustentabilidade no setor da construção é um desafio complexo devido à sua ampla abrangência e interações sistêmicas (Mhatre *et al.*, 2021). Para mitigar essa complexidade, argumenta-se que a implementação da Economia Circular (EC) representa um estágio fundamental na transição para práticas mais sustentáveis na construção civil (Geissdoerfer *et al.*, 2017).

A EC tem sido cada vez mais recomendada como uma alternativa viável à economia linear "fazer-usar-descartar", especialmente nos últimos anos (Joensuu; Edelman; Saari, 2020; van Stijn *et al.*, 2021). A circularidade na IC está estreitamente vinculada à abordagem de EC proposta e desenvolvida pela Fundação Ellen MacArthur (Nobre; Tavares, 2021). Essa abordagem pode auxiliar o setor da construção a diminuir sua pegada ambiental e a quantidade de resíduos, ao mesmo tempo em que evita aumentos de custos, atrasos e outras consequências decorrentes dos mercados voláteis de *commodities* (Akhimien; Latif; Hou, 2021).

A definição da EC aplicada a IC varia conforme o estágio do ciclo de vida do projeto. Assim, embora a construção circular seja amplamente discutida, não há consenso sobre seu significado, que diverge na literatura segundo a perspectiva de cada autor (Murray; Skene; Haynes, 2017). Alguns estudos associam a EC à gestão de materiais, fundamentando-se no conceito de produção circular, enquanto outros a interpretam como um princípio que influencia todo o ciclo de vida da construção, com ênfase na fase de projeto. Há ainda aqueles que restringem sua aplicação à gestão eficiente dos Resíduos de Construção e Demolição (Hossain *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2022b, 2022a). No entanto, verifica-se que essas abordagens convergem para a gestão de recursos ao longo do ciclo de vida das construções, definindo as fronteiras do sistema.

Apesar dos avanços nas pesquisas sobre Economia Circular na construção, ainda há lacunas de conhecimento que precisam ser abordadas (Anastasiades *et al.*, 2020; Nobre; Tavares, 2021; Oluleye; Chan; Olawumi, 2022). Adicionalmente, a ausência de uma definição unificada para Construção Circular (CC) representa uma lacuna que impede a orientação adequada de políticas públicas ou estratégias empresariais nesta área. Abordar essa falta pode evitar interpretações equivocadas e usos impróprios do conceito, que podem resultar em desfechos inesperados e imprecisos, gerando uma falsa sensação de eficácia (Chen; Feng; Garcia de Soto, 2022; Yu *et al.*, 2022b, 2022a). É imperativo evitar inadvertidas práticas de *greenwashing*, mesmo quando a abordagem da Simbiose Industrial (SI) - valorização de resíduos intersetoriais, onde resíduos ou subprodutos de uma indústria são valorizados por outra Çimen (2021) - poderia ser aplicada (Joensuu; Edelman; Saari, 2020; Nobre; Tavares, 2021).

2.3.1. ASPECTOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Atualmente, a sustentabilidade é definida como a capacidade de suprir as demandas atuais sem comprometer os recursos disponíveis para as futuras gerações (Tiza *et al.*, 2022). Um dos setores que desempenha um papel fundamental nesse contexto é a indústria de pavimentação, responsável por viabilizar a infraestrutura viária essencial para o transporte e a mobilidade. Dentre os diversos tipos de revestimentos, os pavimentos asfálticos são amplamente empregados devido a suas inúmeras vantagens em comparação com outras

alternativas. No entanto, a sustentabilidade desses pavimentos enfrenta desafios significativos, principalmente devido ao elevado consumo energético e à intensa emissão de gases de efeito estufa (GEE) durante a produção do ligante asfáltico, fatores que contribuem negativamente para o aquecimento global e a degradação ambiental (Jiang; Huang; Sha, 2018). Dessa forma, estratégias voltadas à melhoria da sustentabilidade em pavimentação asfáltica devem priorizar a redução da demanda energética e das emissões, o que pode ser alcançado por meio do aumento da durabilidade das misturas asfálticas e do uso mais eficiente de materiais naturais. No contexto da pavimentação, um pavimento asfáltico sustentável deve não apenas atender às exigências técnicas e de desempenho, mas também incorporar práticas que favoreçam a conservação de recursos e a proteção dos ecossistemas (Plati, 2019; Hasheminezhad; Ceylan; Kim, 2024).

A maioria dos recursos destinados a melhorias rodoviárias está direcionada aos materiais utilizados nas pavimentações (de Lima *et al.*, 2013). Além disso, são exigidos aportes substanciais para a manutenção e reabilitação desses pavimentos. Esses investimentos consideráveis proporcionam uma oportunidade para os tomadores de decisão identificarem projetos de pavimentação que apresentem uma sólida relação custo-benefício (Lu *et al.*, 2018). A construção de pavimentos demanda processos intensivos em energia e materiais, com impactos adversos ao meio ambiente (Santos *et al.*, 2015). Os efeitos ambientais dos pavimentos extrapolam a fase de produção e construção de materiais, envolvendo também interações entre os pavimentos e os veículos (Santos *et al.*, 2015).

As autoridades rodoviárias promovem práticas sustentáveis para mitigar os impactos ambientais negativos dos pavimentos e para embasar decisões de investimento mais econômicas (Wu; Yuan; Liu, 2017). Pavimentos sustentáveis estão intrinsecamente ligados à escolha criteriosa de materiais. A incorporação de materiais residuais é uma estratégia sustentável relevante no âmbito dos materiais de pavimentação (Plati, 2019). Esses materiais residuais podem ser empregados como substitutos de agregados ou ligante em diferentes camadas das estruturas de pavimento (Zhao; Xiao; Amirkhanian, 2020), abrangendo, mas não se limitando a, *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), cinzas volantes, lignina, resíduos de plástico, vidro reciclado e borracha de pneus inservíveis (Norgbey *et al.*, 2020; Plati, 2019).

A sustentabilidade dos pavimentos pode ser avaliada de diversas maneiras por meio de métodos ou ferramentas pertinentes, como a avaliação do desempenho dos pavimentos, a

análise de custos do ciclo de vida (ACCV), a avaliação do ciclo de vida (ACV) e sistemas de classificação de sustentabilidade. ACCV e ACV representam duas abordagens para quantificar e abordar os componentes econômicos e ambientais da sustentabilidade dos produtos ao longo de seu ciclo de vida (Harvey *et al.*, 2016).

A sustentabilidade dos pavimentos asfálticos tem sido aprimorada com a implementação da economia circular nos processos de produção das misturas asfálticas. Esse modelo integra o crescimento econômico com preocupações socioambientais, levando ao desenvolvimento de práticas que otimizam a fabricação ao reduzir a dependência de materiais virgens e, ao mesmo tempo, priorizam o uso de insumos recicláveis e reutilizáveis (Mantalovas; Di Mino, 2019; de Medeiros Melo Neto *et al.*, 2022). No entanto, ainda não há um método padronizado ou um índice que quantifique de maneira eficiente a circularidade dos materiais reciclados aplicados nos pavimentos.

É fundamental estabelecer uma abordagem para identificar e avaliar os impactos ambientais associados ao aumento da circularidade das misturas asfálticas (da Costa *et al.*, 2024). O Índice de Circularidade do Material (ICM) emerge como uma ferramenta eficaz para mensurar o nível de circularidade de produtos, como as misturas asfálticas. A implementação dessa metodologia para as misturas asfálticas recicladas pode promover uma maior conscientização entre as autoridades rodoviárias e as empresas de pavimentação sobre a circularidade de seus processos, contribuindo para a avaliação e aprimoramento da sustentabilidade ambiental de suas práticas e escolhas circulares (de Moraes *et al.*, 2023).

Mantalovas e Di Mino (2020) e Melo Neto *et al.* (2022) avaliaram o Índice de Circularidade do Material (ICM) de misturas asfálticas recicladas utilizando a metodologia padrão, em que o fator de utilidade, relacionado ao desempenho mecânico/técnico das misturas, foi determinado apenas pelos resultados dos ensaios de vida à fadiga e deformação permanente, devido a serem os principais defeitos observados nas rodovias. A Figura 2 apresenta o fluxograma utilizado por Melo Neto *et al.* (2022) para medir a circularidade das misturas asfálticas recicladas com 40% de RAP e ácido graxo proveniente da borra do óleo de soja em teores de 3% e 5%.

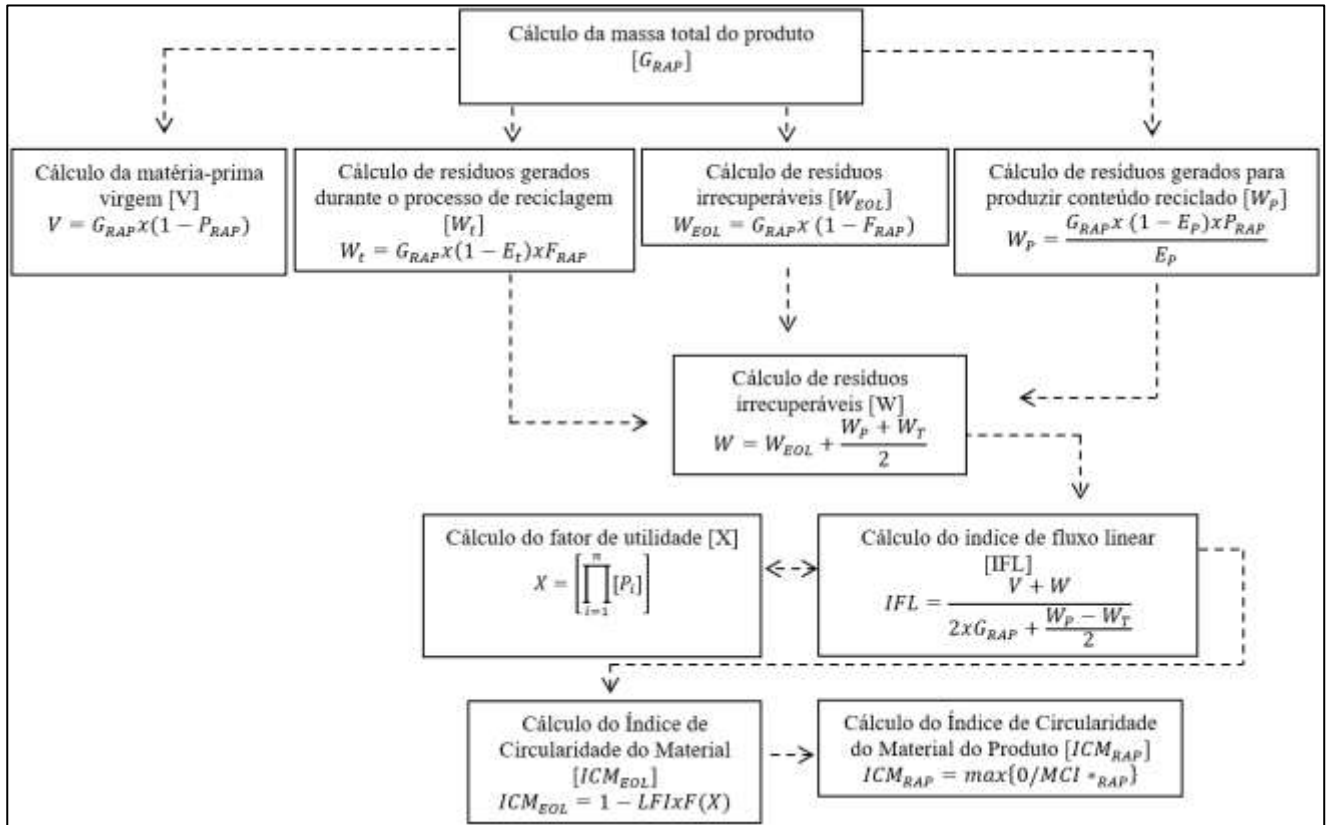


Figura 2 - Definição do fluxo de cálculo dos parâmetros do ICM.

Fonte: Adaptado de Melo Neto *et al.* (2022).

Onde:

- (i) L é a vida útil média real do produto.
- (ii) L_{av} é a vida útil média real de um produto médio da indústria.
- (iii) G_{RAP} é massa do produto final da mistura reciclada com RAP.
- (iv) P_{RAP} é a fração de matéria-prima derivada de fontes recicladas.
- (v) F_{RAP} é a fração da massa do produto coletado por reciclagem no fim da vida.
- (vi) $F(X)$ é o fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas.
- (vii) E_T é a eficiência do processo de reciclagem como tratamento.
- (viii) E_p é a eficiência do processo de reciclagem como produção.
- (ix) ICM_{RAP} é o índice de circularidade da mistura asfáltica reciclada.

Costa *et al.* (2024) avaliaram o Índice de Circularidade do Material (ICM) de misturas asfálticas recicladas com óleo de algodão e zeólita, adaptando o método empregado pelos autores mencionados anteriormente. Essa adaptação incluiu a incorporação de parâmetros mecânicos adicionais para aprimorar a representatividade das misturas em relação aos aspectos técnicos e de durabilidade. Foram adicionados ao fator de utilidade parâmetros obtidos nos ensaios de resistência à tração, dano por umidade induzida, desgaste Cântabro, além dos ensaios de vida à fadiga e deformação permanente. A Figura 3 ilustra o fluxograma adaptado utilizado na determinação do ICM das misturas recicladas.

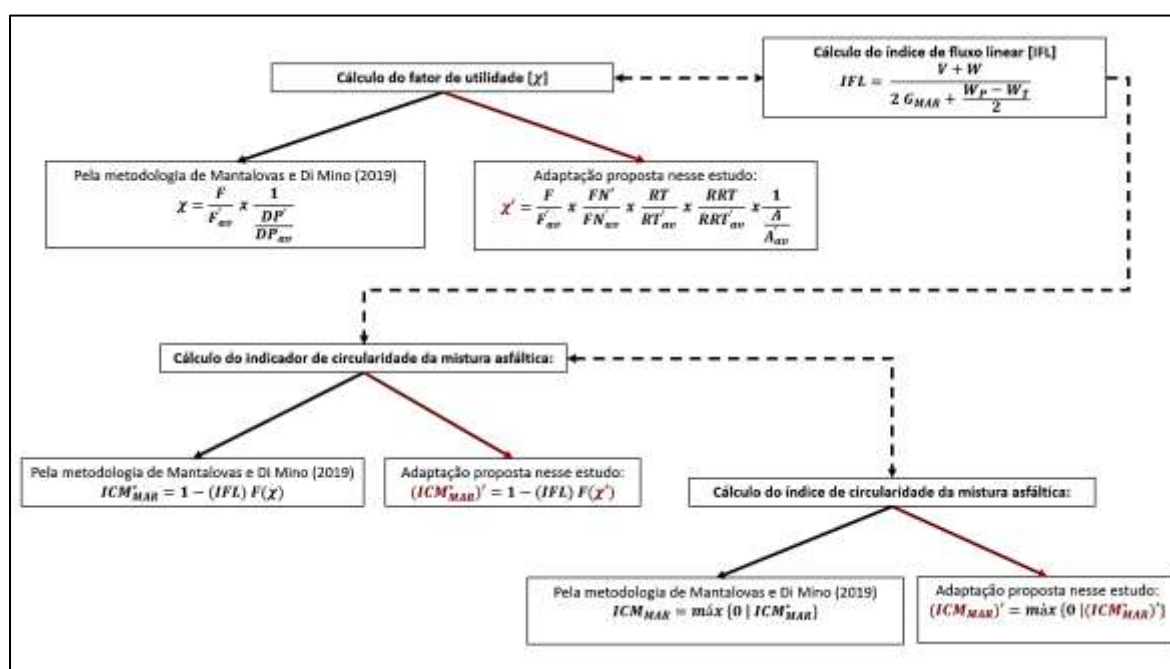


Figura 3 – Fluxograma para cálculo do Índice de circularidade das misturas asfálticas.

Fonte: Adaptado de Costa *et al.* (2024).

Os autores (Mantalovas; Di Mino, 2019, 2020; de Medeiros Melo Neto *et al.*, 2022; da Costa *et al.*, 2024) observaram que a circularidade medida por este indicador está diretamente relacionada a um desempenho mecânico favorável e a uma maior proporção de materiais residuais na composição das misturas. Ou seja, para aumentar a circularidade das misturas asfálticas, é viável incorporar materiais de origem residual em maiores quantidades, desde que essa adição resulte em melhorias ou equivalência no desempenho mecânico das misturas asfálticas.

A abordagem metodológica apresentada por Costa *et al.* (2024) não revelou variações significativas no cálculo do ICM ao considerar uma maior quantidade de ensaios mecânicos

no fator de utilidade (X), quando comparada ao método que levou em conta apenas a deformação permanente e a vida útil por fadiga. Esse ponto é relevante, pois não é desejável estabelecer um índice de circularidade que exija esforços e custos elevados, como a execução de um grande número de ensaios mecânicos. A indústria da pavimentação necessita de um índice integrado de circularidade e sustentabilidade que seja mais abrangente e eficaz, isto é, que reflita de maneira mais realista os aspectos técnicos, econômicos e ambientais da economia circular, sem demandar modelagens complexas e custos excessivos para sua determinação.

Assim, a avaliação da circularidade das misturas asfálticas exige a consideração dos custos. A Figura 4 apresenta, de forma geral, as etapas de custos dentro da abordagem “*cradle to grave*” (do berço ao túmulo), abrangendo desde a produção das misturas asfálticas e a construção das camadas de revestimento até as fases de manutenção, conservação e, ao término da vida útil, a fresagem a frio da camada asfáltica.



Figura 4 - Etapas relacionadas aos custos do revestimento asfáltico de rodovias.

Os custos de produção de pavimentos derivados de resíduos englobam os custos de reciclagem de resíduos, extração, aquisição e os custos de produção de matérias-primas (Harvey *et al.*, 2016). Esses custos abrangem despesas com equipamentos, mão de obra, transporte de materiais e energia (Van Dam *et al.*, 2015). Os custos associados aos processos na planta incluem os custos de energia para a mistura, aquecimento e secagem de materiais (Li *et al.*, 2013). Diversos componentes relacionados à fase de produção de materiais derivados de resíduos implicam custos mais elevados para as agências rodoviárias, tais como materiais adicionais, aditivos, equipamentos e mão de obra (Zhao; Xiao; Amirkhanian, 2020).

Os processos de campo, abrangendo o transporte de misturas e equipamentos, limpeza do local, escavação, construção e compactação das camadas rodoviárias, constituem os custos de construção de pavimentos (Vidal *et al.*, 2013). Os componentes de custos relacionados aos processos construtivos englobam o transporte de máquinas e materiais, equipamentos, mão de obra, armazenamento e medidas de segurança (Santos *et al.*, 2015). Durante a vida útil dos pavimentos, uma série de obras de manutenção e reabilitação é realizada para assegurar a operacionalidade dos pavimentos (Harvey *et al.*, 2016). Os componentes de custos das atividades de manutenção e reabilitação assemelham-se aos da fase de construção (Santos *et al.*, 2015). No final da vida útil do pavimento, os pavimentos fresados ou demolidos podem ser reciclados, reutilizados ou eliminados. Os custos associados à fase do fim de vida incluem taxas de eliminação, transporte, mão de obra e desconstrução (Moins *et al.*, 2020).

Ao explorar alternativas para misturas asfálticas compostas por materiais residuais, é fundamental assumir a premissa de que essas misturas devem oferecer durabilidade similar ou superior às soluções tradicionais, desde que os processos produtivos, como logística e *layout* das usinas, e os processos construtivos, incluindo o maquinário necessário, permaneçam inalterados. Nesse contexto, espera-se que os custos de construção, manutenção e conservação sejam equivalentes, independentemente da composição das misturas, incluindo também os custos relativos ao fim da vida útil. Contudo, no que diz respeito aos custos de produção, as misturas asfálticas recicladas resultam em uma redução na aquisição de materiais virgens, impactando positivamente na diminuição dos custos com insumos materiais.

É importante ressaltar que os custos de produção devem ser analisados conforme as metodologias amplamente utilizadas no setor rodoviário, como o Sistema de Custos

Referenciais de Obras (SICRO), adotado no Brasil, para as diferentes misturas – convencionais e recicladas.

2.4. PERSPECTIVAS DA BIOECONOMIA E O ÓLEO DE BABAÇU

A bioeconomia é um modelo de produção industrial que se fundamenta na utilização de recursos biológicos. Seu objetivo é proporcionar soluções sustentáveis para os sistemas produtivos, substituindo recursos fósseis e não renováveis. Em um país megabiodiverso como o Brasil, que possui a maior diversidade biológica do planeta, com mais de 100 mil espécies animais e aproximadamente 45 mil espécies vegetais conhecidas, é essencial investir em um modelo econômico que se baseie no uso sustentável dos recursos naturais. Quando devidamente caracterizados e explorados de maneira racional, esses recursos podem contribuir de forma significativa para impulsionar a bioeconomia nacional (Embrapa, 2024).

O interesse pela sustentabilidade intensifica-se à medida que a sociedade reconhece os limites do modelo de desenvolvimento dependente de recursos não renováveis, no contexto de uma mudança gradual dos anseios sociais, da busca por segurança energética e das novas possibilidades de produção. Com o crescimento populacional e a ampliação da capacidade de consumo, aumenta também o desejo por uma economia que utilize mais recursos biológicos, recicláveis e renováveis, e, portanto, mais sustentáveis – que constituem a base da bioeconomia (Lopes, 2015).

O Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA) apresentou seu planejamento estratégico para o período de 2024 a 2027 durante uma cerimônia realizada no auditório do ministério, em Brasília (DF). As ações do MMA nos próximos três anos focarão em cinco programas principais: proteção e recuperação da biodiversidade e combate ao desmatamento e incêndios, bioeconomia, qualidade ambiental nas áreas urbanas e rurais, enfrentamento da emergência climática e gestão de recursos hídricos. No âmbito do programa de bioeconomia, o MMA implementará a Política Nacional de Bioeconomia, promovendo o desenvolvimento de economias orientadas pelo uso sustentável da biodiversidade. Outros objetivos incluem a concessão de florestas para manejo florestal sustentável, a implementação da Política Nacional de Pagamentos por Serviços Ambientais, a melhoria das condições

econômicas dos povos e comunidades tradicionais e a gestão ambiental de territórios rurais (Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2024).

A biodiversidade é um recurso primordial para o futuro da bioindústria, e o Brasil detém a maior diversidade biológica do mundo, com muitos ativos de grande interesse comercial e econômico. A bioeconomia oferece possibilidades concretas para a utilização sustentável dessa biodiversidade, o que envolve desafios em diversos campos – biológico, econômico, político e cultural – todos essenciais para compreender e prever cenários viáveis para o desenvolvimento dessa nova vertente econômica (Lopes, 2015).

Por entender que a bioeconomia é um importante fator de inclusão social e desenvolvimento regional, o documento também traz como diretriz o incentivo à inserção da mulher e dos jovens à atividade, a formação e capacitação profissional para promoção ao empreendedorismo e o respeito aos direitos dos povos indígenas e de comunidades tradicionais à autodeterminação e ao uso e gestão tradicional de seus territórios (Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços, 2024).

O avançado embasamento técnico da biotecnologia moderna já permite a criação de uma vasta gama de novos produtos e processos, tais como energia renovável, alimentos funcionais e biofortificados, biopolímeros, novos materiais, medicamentos e cosméticos. Isso proporciona ao Brasil uma oportunidade ímpar de participar significativamente desse desafio, assegurando uma posição competitiva para produtos e processos inovadores de base biológica, em setores essenciais como a agricultura, a saúde e as indústrias química, de materiais e de energia (Lopes, 2015).

No contexto da bioeconomia associada aos princípios da economia circular, o óleo de babaçu emerge como uma alternativa promissora, especialmente quando incorporado à produção de misturas asfálticas contendo RAP (resíduo de misturas asfálticas pós-consumo). O termo “Babaçu” é utilizado para descrever palmeiras oleaginosas da família *Palmae*, pertencentes aos gêneros *Orbignya* e *Attalea*. O gênero *Orbignya* é predominante nas regiões norte e nordeste do Brasil, abrangendo estados como Maranhão, Piauí, Pará e Tocantins. Entre as espécies deste gênero, destacam-se *Orbignya phalerata* Mart. (babaçu verdadeiro), *Orbignya eichleri* Drude (piaçava), *Orbignya teixeirana* Bondar (perinão) e *Orbignya microcarpa* Martius. O gênero *Attalea*, por sua vez, abrange espécies encontradas

principalmente em Goiás, Minas Gerais e Bahia, como *Attalea oleifera* Barb. Rodr. (catolé-de-pernambuco) e *Attalea pindobassu* Bondar (pindobaçu) (de Paula Protásio *et al.*, 2014).

Dentre essas espécies, *Orbignya phalerata* é a mais amplamente distribuída, apresentando grande variação morfológica e relevância econômica. Ela ocupa vastas áreas no Brasil, somando mais de 14.563.000 hectares nativos, localizados ao sul da bacia amazônica (de Paula Protásio *et al.*, 2014; Santos *et al.*, 2022), e também é encontrada na Bolívia e no Suriname (Zylbersztajn *et al.*, 2000b). Natural do ecótono entre o cerrado e as florestas abertas da Amazônia sul, o babaçu se estabeleceu em regiões impactadas pela atividade humana, formando populações oligárquicas que podem alcançar até 20 metros de altura (Clement; Lleras; Leeuwen, 2005).

Uma característica marcante da palmeira de babaçu verdadeira é a disposição de suas folhas, que formam ângulos superiores a 250° em relação ao horizonte, facilitando sua identificação em comparação a outras palmeiras da região. Além disso, a espécie possui ampla aplicabilidade, abrangendo o uso de seu tronco, folhas e frutos (Teixeira, 2002).

Em áreas de alta densidade de babaçu, a biomassa total pode atingir 69,1 toneladas de peso seco por hectare, com uma produção anual de folhas de até 16,8 toneladas por hectare. Essa elevada produção fornece combustível suficiente para sustentar práticas agrícolas itinerantes. Para viabilizar o cultivo intercalado de culturas anuais, algumas palmeiras são removidas, permitindo o crescimento das plantações e garantindo a disponibilidade de diversos produtos para subsistência e comercialização ao longo do período de pousio. Em densidades variando de 141 a 160 palmeiras por hectare em diferentes estágios de crescimento, a produtividade máxima dos babaçuais na região dos Cocais é estimada em 2,1 toneladas de coco por hectare (May, 1987).

Kono (1976) registrou uma produtividade média de 2,5 toneladas por hectare ao ano em um levantamento realizado em 1.400 hectares de babaçuais no município de Codó (MA). Segundo Zylbersztajn *et al.* (2000b), a espécie *Orbignya oleifera* apresenta maior produção de frutos em comparação com *O. phalerata*, atingindo 5 toneladas por hectare ao ano, com teor de amêndoas variando entre 10% e 22%.

O óleo da amêndoa, principal produto do babaçu, corresponde a 65% de seu peso e é amplamente utilizado na fabricação de sabão, glicerina e óleo comestível, posteriormente

convertido em margarina. A borra residual também é reaproveitada na produção de ração animal e na extração de óleo comestível (Albiero *et al.*, 2007).

Segundo Frazão (2001), a produção média de frutos de babaçu é de 2.400 kg por hectare, dos quais 74% correspondem à casca externa, 20% ao mesocarpo e 6% às amêndoas, permitindo a obtenção de 91 litros de óleo. A extração do óleo das sementes envolve métodos tradicionais seguidos de neutralização e purificação. Esse óleo apresenta composição química e propriedades sensoriais similares às do óleo de coco (*Cocos nucifera*) e dendê (*Elaeis guineensis*) (Lopes, 1983).

A transesterificação com metanol ou etanol possibilita a produção de biodiesel, um combustível renovável adequado para motores a diesel. Além disso, a extração de leite e óleo comestível das amêndoas e a produção de farinha de babaçu a partir do mesocarpo são práticas comuns. Essa farinha pode substituir a de mandioca ou ser utilizada na alimentação animal. Apesar do conhecimento empírico sobre suas aplicações farmacêuticas, ainda há carência de pesquisas científicas para validação (Lopes, 1983).

Zylbersztajn *et al.* (2000b) relatam que o processamento dos cocos de babaçu gera dois tipos de óleo: um destinado ao consumo alimentício e outro voltado para aplicações industriais, conhecido como óleo láurico. No entanto, o uso do óleo de babaçu na alimentação tem diminuído progressivamente, principalmente devido à substituição por óleos mais acessíveis e à preferência dos consumidores por gorduras insaturadas.

Segundo diretrizes da Embrapa (1984), a produtividade do babaçu é condicionada por fatores climáticos específicos, entre eles: (i) incidência solar mínima de 2.400 horas anuais ou radiação total mensal de 360 cal.m⁻²; (ii) evapotranspiração máxima de 280 mm durante o trimestre mais seco do ano — setembro, outubro e novembro, embora, acima do paralelo 3° Sul, esse período ocorra entre junho e agosto, e, nas regiões centrais, entre julho e setembro; (iii) precipitação anual superior a 1.700 mm; (iv) disponibilidade hídrica na zona radicular durante os três meses mais secos, sem ultrapassar 400 mm; (v) ventos com velocidade inferior a 3 m/s; e (vi) presença de vales orientados no sentido leste-oeste, favorecendo tanto a umidade quanto a exposição solar.

Embora a exploração do babaçu tenha se baseado no extrativismo primário, essa atividade teve um impacto relevante na economia do Estado do Maranhão até meados da

década de 1980. Esse papel econômico decorre da utilização do babaçu como matéria-prima para um parque industrial voltado à extração de óleo vegetal, estruturado especificamente para o processamento das amêndoas oleaginosas presentes em seus frutos (Albiero *et al.*, 2007).

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (2017), a amêndoa do babaçu é classificada como um produto da sociobiodiversidade, com o Maranhão figurando como o principal produtor, sendo responsável por 94% da produção nacional. Apesar de integrar os Sistemas Agrícolas Tradicionais, a cadeia produtiva do babaçu ainda carece de estruturação adequada, tanto no setor agrícola quanto na dinâmica de mercado. Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) apontam a necessidade de investimentos em tecnologia, capacitação de mão de obra e fortalecimento do ambiente de mercado para o óleo de babaçu, a fim de impulsionar sua produção e consolidá-la no cenário econômico nacional.

De acordo com Zylbersztajn *et al.* (2000b), uma quebradeira de coco extrai, em média, 5 kg de amêndoas por dia de trabalho, embora algumas trabalhadoras possam alcançar uma produtividade de até 15 kg diários. A atividade de quebra do babaçu possui uma forte relação com a questão de gênero, sendo a principal fonte de renda exclusivamente gerada por mulheres no contexto familiar. Como resultado, essa atividade assumiu um papel simbólico no empoderamento feminino dentro das comunidades extrativistas.

A quebra do coco para a extração da amêndoa é considerada uma atividade "feminina". No total, 81% do trabalho dedicado à extração da amêndoa é realizado por mulheres e crianças, enquanto a participação dos homens é mais proeminente na agricultura. Além da extração de amêndoas, as famílias obtêm óleo para fins culinários, sabão e um substituto de querosene usado em lamparinas a partir dessas amêndoas. Do endocarpo lenhoso que abriga as amêndoas, produz-se carvão utilizado para atender às necessidades de combustível das famílias, contribuindo assim para a preservação das florestas, ao reduzir a coleta excessiva de madeira para energia (Albiero *et al.*, 2007).

Entre as décadas de 1960 e o início dos anos 1980, a economia babaçueira atingiu seu ápice, com o Estado do Maranhão abrigando 52 empresas de médio e grande porte dedicadas à produção de óleo de babaçu. Esse óleo era amplamente utilizado nas indústrias alimentícia, de higiene e de limpeza, tanto no mercado interno quanto no exterior (Herrmann *et al.*, 2001).

A partir de 1990, a liberalização das importações e a crescente globalização intensificaram a concorrência no mercado nacional de óleos láuricos, afetando diretamente o óleo de babaçu, cuja extração ainda se baseava no extrativismo primário. O óleo de palmiste, derivado das sementes de dendê e produzido em plantações industriais altamente produtivas nas Filipinas, passou a ser comercializado no Brasil a um preço correspondente a cerca de 70% do valor do óleo de babaçu, tornando-se uma alternativa economicamente mais viável (Frazão, 2001).

Anjos e Santos (2019) apontam que o óleo de babaçu tem sido estudado para aplicação em diferentes áreas tecnológicas, e dados extraídos de bases oficiais confirmam um mercado consumidor inclusive internacional. Os autores verificaram o mercado consumidor do óleo de babaçu e analisaram a tendência do valor de exportação do óleo bruto de babaçu brasileiro entre os anos de 2007 e 2016. Perceberam destaque do mercado holandês na importação do óleo bruto de babaçu, com vendas anuais a este país e com tendência de aumento, com valor de exportação para esse país de 1.074.120,09 (U\$), equivalente a 62,61% da receita de exportação desse óleo para o exterior. O óleo de babaçu tem demonstrado aplicação tecnológica, prioritariamente, nas áreas de Ciência de Polímeros, Engenharias, Farmacologia e Energia/Combustível. Van Den Bos e Lipschits (2015) assinalam essas áreas como mercados industriais de grande potencial de uso de biomassas nativas do Brasil. Estes autores reforçam também que o uso de biomassas brasileiras é uma grande oportunidade para instituições de ciência e tecnologia holandesas.

A crescente preocupação em reduzir os efeitos negativos decorrentes da exploração de recursos fósseis tem impulsionado investigações relacionadas a espécies oleaginosas, que são consideradas como promissoras fontes de biomassa para fins industriais. O aumento nas pesquisas científicas voltadas para os óleos vegetais no cenário brasileiro encontra justificativa na promoção do uso desses óleos na produção de biodiesel. A investigação de óleo vegetal por espécie de origem mostra que a soja, entre as exóticas com sistema produtivo monitorado no Brasil, detém o maior número de publicações e a maior taxa de crescimento ao longo do período de 2008 a 2017. Entre as nativas, as maiores taxas de crescimento no período de estudo são das espécies babaçu e macaúba, embora o número de publicações seja bastante inferior ao das demais espécies exóticas (Santos *et al.*, 2022).

Santos *et al.* (2022) categorizaram as pesquisas realizadas no período de 2008 a 2017, que abordaram o óleo de Babaçu, de acordo com as áreas de conhecimento em que se inserem. Os resultados revelaram que a maioria dessas pesquisas (36%) se enquadra na área de Energia e Combustíveis, enquanto a parcela menor (4%) está relacionada à Alimentação Humana. Isso ressalta o potencial de explorar estudos sobre o uso do óleo de Babaçu em aplicações relacionadas à pavimentação, como agente rejuvenescedor para misturas asfálticas recicladas. Uma investigação mais aprofundada sobre a utilização desse óleo nesse contexto pode estimular investimentos nas etapas de produção e extração do óleo, gerando valor agregado para as atividades extrativistas nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. Além disso, o fato de o óleo de Babaçu não ser amplamente empregado na indústria alimentícia sugere que seu uso em larga escala não enfrentará competição direta com essa indústria.

Há mais de vinte anos, a Cooperativa dos Pequenos Produtores Agroextrativistas de Lago do Junco (COPPALJ) vem consolidando sua atuação em um segmento específico do mercado, com a produção e exportação anual de mais de 150 toneladas de óleo de babaçu certificado como orgânico. Esse produto tem como principal destino empresas do setor de cosméticos que valorizam sua procedência e qualidades naturais (Vicari, 2014). Paralelamente, o Movimento Interestadual de Quebradeiras de Coco Babaçu (MIQCB) tem promovido novas iniciativas em diversas regiões, como o Mearim, o Tocantins, o Piauí, o sul do Pará e a Baixada Maranhense. Apesar de essas experiências representarem apenas cerca de 2% do volume total de amêndoas comercializadas anualmente, sua relevância simbólica é significativa, pois fortalece a capacidade de negociação dos movimentos sociais na luta por políticas públicas que ampliem esse tipo de oportunidade econômica (Porro, 2019).

O projeto "Floresta de Babaçu em Pé" liderado pela Associação do Movimento Interestadual das Quebradeiras de Coco Babaçu (MIQCB) busca fortalecer cadeias produtivas agroextrativistas sustentáveis do babaçu nos estados do Maranhão, Tocantins, Pará e Piauí. Com suporte financeiro do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) por meio do Fundo Amazônia, serão destinados R\$1,6 milhão a projetos de organizações não governamentais e comunitárias para conservação e uso sustentável da biodiversidade do babaçu. O projeto totaliza R\$9,2 milhões e facilita o acesso a recursos financeiros que promovem a geração de renda, estimulando o desenvolvimento de habilidades, assistência técnica e o fortalecimento do associativismo na região (Partido dos Trabalhadores, 2023).

2.5. PONDERAÇÕES

As misturas asfálticas são os materiais mais empregados na composição da camada de revestimento de pavimentos flexíveis em escala global. Essas misturas passam por avaliação de desempenho mecânico por meio de ensaios padronizados, que estabelecem limites viáveis para seu uso e aplicação em rodovias. No entanto, no contexto brasileiro, após alguns anos da construção, observa-se a manifestação de diversos defeitos na camada de rolamento, tais como trincamento por fadiga e afundamento plástico. Esses problemas têm origem em diversos fatores, incluindo variação climática intensa, utilização intensiva do modal rodoviário para transporte de cargas pesadas, flutuações no nível de tráfego, erros de construção, dosagem inadequada, falta de estruturas de drenagem e incompatibilidade entre as camadas de pavimento em termos de rigidez e flexibilidade.

Existe uma busca intensiva por metodologias que aprimorem o processo de dimensionamento dos pavimentos flexíveis no Brasil, bem como por materiais mais sustentáveis e duráveis, visando a redução dos impactos e custos associados aos processos de manutenção, reconstrução e fim de vida útil da camada de revestimento asfáltico. O RAP, resíduo proveniente do processo de fresagem da camada de revestimento asfáltico, emerge como uma alternativa sustentável ao ser considerado como matéria-prima na produção de novas misturas asfálticas. Suas características estruturais e constitucionais específicas impõem limites à quantidade a ser adicionada, demandando a incorporação de aditivos que possibilitem a recuperação de parte de sua funcionalidade.

A necessidade de aditivos compatíveis quimicamente com o ligante asfáltico envelhecido presente no RAP destaca-se como um desafio significativo. Dado o elevado consumo de matéria-prima nos processos construtivos, há uma busca por aditivos que causem menor impacto ambiental e que sejam obtidos por meio de processos mais sustentáveis e de fontes renováveis. Nesse contexto, o óleo de babaçu surge como opção alinhada a esses requisitos. No entanto, a literatura carece de estudo que investigue esse óleo como agente rejuvenescedor em misturas com teores superiores a 30% de RAP.

A aplicação de misturas contendo RAP e agentes de reciclagem no pavimento visa atingir uma vida útil comparável à de misturas tradicionais. A consideração da circularidade

dessas misturas sob a perspectiva da economia circular é de extrema relevância. Apesar da existência de algumas metodologias para mensurar essa circularidade, falta um mapeamento que indique qual método é mais convincente ou representativo. Para buscar uma abordagem mais realista, surgem questões sobre a viabilidade das misturas asfálticas quanto aos aspectos técnico e circular. Propõe-se a utilização de um índice de circularidade que permita uma comparação mais abrangente, facilitando o processo de tomada de decisão na escolha da mistura asfáltica mais viável.

CAPÍTULO 3

3. INVESTIGAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E REOLÓGICA DE LIGANTES ASFÁLTICOS COM ÓLEO DE BABAÇU

Neste capítulo, foram detalhados os materiais e métodos utilizados para avaliar a aplicabilidade do óleo de babaçu como agente rejuvenescedor em ligantes asfálticos. Foram abordadas as metodologias aplicadas para o envelhecimento a curto e longo prazo dos ligantes asfálticos, tanto puros quanto modificados com óleo de babaçu, bem como os ensaios laboratoriais adotados para a caracterização física, reológica e química.

Os ensaios conduzidos nesta avaliação seguiram as diretrizes das normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). As análises realizadas foram subdivididas em duas partes: a primeira parte investigou amostras de ligante asfáltico virgem e envelhecido a longo prazo, com adição de óleo de babaçu diretamente ao ligante e também como modificador de um ligante asfáltico virgem; na segunda parte foi verificada a adição do óleo de babaçu em ligantes asfálticos recuperados de diferentes RAPs, a fim de avaliar os efeitos sobre a rigidez e a fadiga dos ligantes de RAPs de origens distintas.

Os processos de caracterização física e reológica das amostras de ligante asfáltico foram conduzidos no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). As análises químicas foram realizadas no Laboratório de Materiais Multifuncionais e Experimentação Numérica (LAMMEN) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). A Figura 5 ilustra um fluxograma das etapas desenvolvidas nesta investigação.

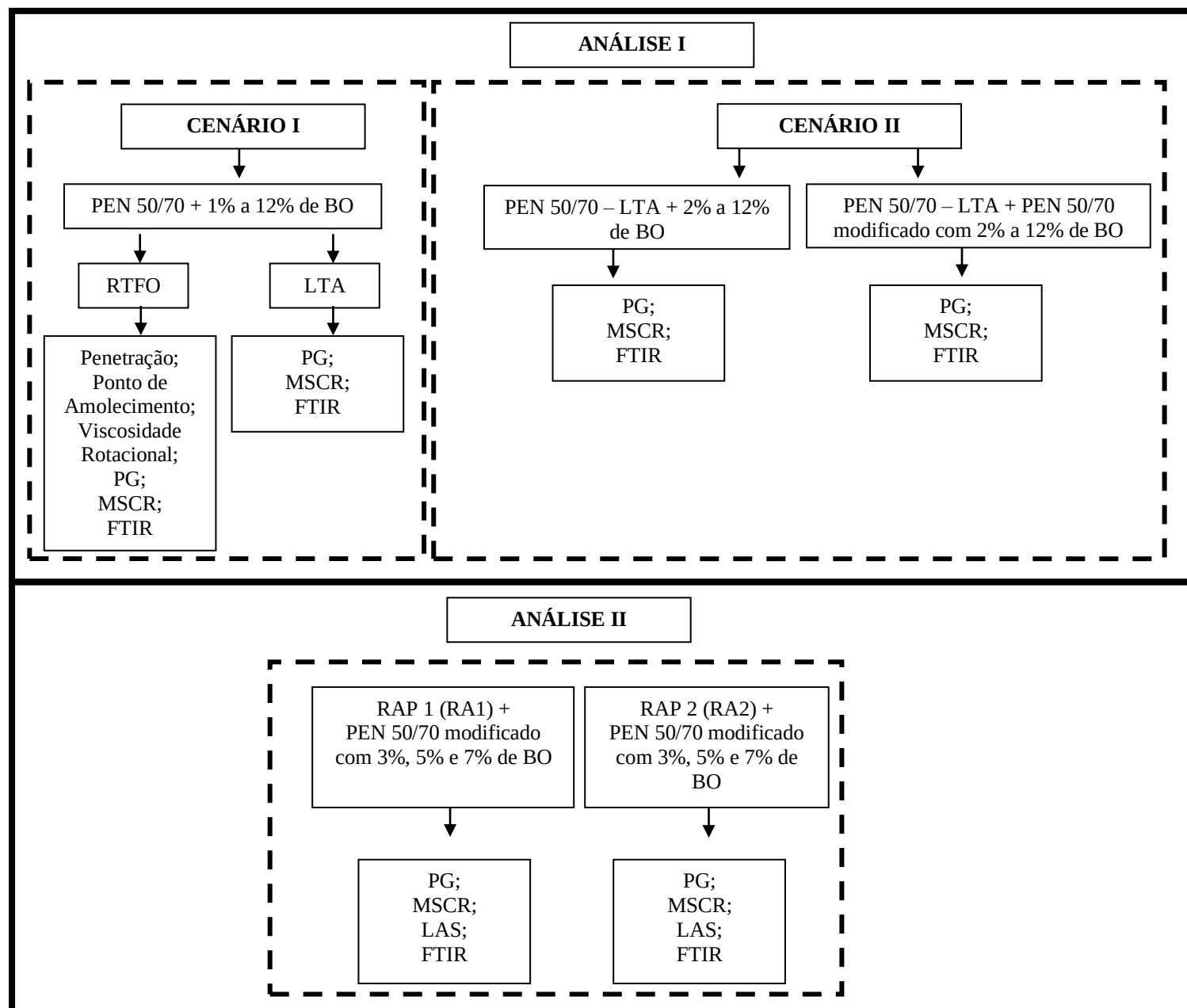


Figura 5 - Fluxograma da avaliação dos ligantes asfálticos com óleo de babaçu.

3.1. MATERIAIS

3.1.1. LIGANTE ASFÁLTICO

O ligante asfáltico selecionado para integrar as misturas asfálticas neste estudo é o PEN 50/70 com temperatura máxima de PG de 64°C. A escolha justifica-se pela ampla

aplicação desse ligante na região Nordeste do Brasil, onde a pesquisa foi conduzida. A Tabela 1 apresenta a caracterização física e reológica desse ligante asfáltico.

Os resultados dos ensaios físicos e reológicos realizados no ligante PEN 50/70, apresentados na Tabela 1, encontram-se dentro dos limites estabelecidos pelas normas americanas. Portanto, o ligante asfáltico demonstrou ser adequado para compor as misturas asfálticas neste estudo. Pesquisas anteriores (Carvalho *et al.*, 2021; Porto *et al.*, 2022; Minervina Silva *et al.*, 2024) que empregaram o mesmo tipo de ligante base para misturas asfálticas obtiveram resultados similares aos apresentados neste trabalho.

Tabela 1 - Caracterização do ligante PEN 50/70.

Ensaio	Resultados	Limites	Normas
Penetração 0.1 mm (100g, 5s a 25°C)	58	50 a 70	ASTM D5 (2020)
Ponto de Amolecimento (°C)	52	≥46	ASTM D36 (2020)
Viscosidade 135 °C	401,00	≥274	ASTM D4402 (2015)
Rotacional (cP) 150°C	198,00	≥112	
177 °C	72,75	57 a 285	
Temperatura máxima de PG (°C)	64	NA	ASTM D6373 (2021)
RTFO			ASTM D2872 (2019)
Viscosidade 135 °C	557,50	NA	ASTM D4402 (2015)
Rotacional (cP) 150°C	269,00	NA	
177 °C	94,00	NA	
Temperatura máxima de PG (°C)	64	NA	ASTM D6373 (2021)
Jnr a 0.1 kPa	3,40	NA	2,0 a 4,5 – Tráfego padrão (S)
Jnr a 3.2 kPa	3,83	NA	
Percentual de recuperação a 0.1 kPa	5,03	NA	
MSCR			ASTM D7405 (2020)
Percentual de recuperação a 3.2 kPa	0,37	NA	

Nota: Jnr: compliância não recuperável, MSCR: *multiple stress creep recovery*, PG: *performance grade*, RTFO: *rolling thin-film oven*.

3.1.2. ÓLEO DE BABAÇU

O óleo de babaçu, cujo nome científico é *Orbignya oleífera* foi fornecido pela empresa AmazonOil. Trata-se de um óleo de origem extrativista, obtido por prensagem a frio das amêndoas e não é indicado para consumo humano. A Figura 6 ilustra o óleo de babaçu e a Tabela 2 apresenta a caracterização química detalhada do aditivo.



Figura 6 - Óleo de babaçu.

Tabela 2 - Caracterização química do óleo de babaçu.

Item	Unidade	Resultado	Método
Óleo de babaçu			
Aparência (25° C)	NA	Líquido	Visual
Cor	NA	Amarelo translúcido	Organoléptico
Odor	NA	Característico	Organoléptico
Índice de acidez	mg KOH/g	3,69	(AOCS Cd 3d-63, 2017)
Índice de peróxido	meq O ₂ /kg	0,39	(AOCS Cd 8-53, 2017)
Índice de iodo	gI ₂ /100g	17,0	(AOCS Tg 2a-64, 2017)
Índice de saponificação	mg KOH/g	247,6	(AOCS Cd 3-25, 2017)
Densidade(25°C)	g/mL	0,920	(AOCS Cc 10c-95, 2017)
Matéria insaponificável	%	< 1	(AOCS Ca 6a-40, 2017)
Ponto de fusão	°C	22 – 26	(AOCS Cc 1-25, 2017)
Bactérias totais	Ufc/ml	<10 ³	(ISO 4833-1, 2013)
Fungos e leveduras	Ufc/ml	<2,10 ²	(NFV 08 036, 2003)
pH na água	NA	5,82	pHmetro
pH no etanol (99%)	NA	5,38	pHmetro
Umidade e voláteis	%	0,42	Secagem em estufa
Valores de referência da composição de ácidos graxos do óleo de babaçu, conforme especificações da American Oil Chemists' Society (AOCS)			
Ácido graxo	Estrutura	Valores de referência (%)	
Ácido Caprílico	C8:0	2,6-7,3	
Ácido Cáprico	C10:0	1,2-7,6	
Ácido Láurico	C12:0	40,0-55,0	
Ácido Mirístico	C14:0	11,0-27,0	
Ácido Palmítico	C16:0	5,2-11,0	
Ácido Estearico	C18:0	1,8-7,4	
Ácido Oleico (Ômega 9)	C18:1	9,0-20,0	
Ácido Linoleico (Ômega 6)	C18:2	1,4-6,6	

Nota: NA: não aplicável.

A porcentagem de insaturação influencia diretamente a estabilidade e a meia-vida oxidativa dos óleos. No caso do óleo de babaçu, sua baixa taxa de insaturação se deve à elevada concentração de ácidos graxos saturados, como os ácidos caprílico, cáprico, mirístico e esteárico, que representam aproximadamente 83% de sua composição (Brandão Júnior *et al.*, 2023). O ácido láurico corresponde à maior proporção entre os ácidos presentes, representando cerca de 50%. Essa característica reduz a suscetibilidade à oxidação, conferindo ao óleo maior estabilidade térmica e potencial para melhorar a durabilidade do ligante asfáltico reciclado. Pahlavan *et al.* (2018) observaram, por meio de espectroscopia FTIR, uma elevada presença de grupos funcionais polares em bioaditivos rejuvenescedores, os quais promovem maior solubilidade do ligante envelhecido e, consequentemente, melhoria das propriedades reológicas. Complementarmente, Rajib *et al.* (2022) demonstraram que a eficácia de sete bio-óleos aplicados ao ligante PG 64-22 está associada à presença de ácidos graxos e compostos vegetais, os quais atuam na peptização dos asfaltenos oxidados e na redução do tamanho dos nanoagregados, promovendo significativa recuperação das propriedades viscoelásticas do ligante.

Brandão Júnior *et al.* (2023) destacam a existência de óleos com diferentes níveis de estabilidade oxidativa. Óleos considerados instáveis apresentam elevado teor de insaturações, como o ácido linolênico — predominante no óleo de linhaça — que, devido à sua alta reatividade, sofre rápida oxidação e solidificação quando exposto ao ar, sendo amplamente utilizado na formulação de tintas. Em contrapartida, ácidos graxos como oleico, cáprico, caprílico e esteárico, principais constituintes do óleo de babaçu (BO), conferem elevada estabilidade oxidativa, uma vez que são menos suscetíveis à perda de grupos funcionais e não promovem reações de oxidação sob condições usuais de exposição.

Oldham *et al.* (2021) destacam que o elevado teor de ácidos graxos — especialmente a presença de mais de 40% de ácido láurico — aliado à natureza não secante do óleo, favorece seu efeito amaciante sobre o ligante asfáltico. No entanto, tais características podem comprometer a resistência da mistura aos danos induzidos pela umidade. Nesse contexto, Fini *et al.* (2019) sugerem que a eficácia de materiais minerais finos na mitigação do acúmulo de ácido palmítico na interface ligante-sílica está associada à química superficial, à porosidade e à área superficial específica desses materiais. Esses pós promovem uma área de interação adicional que favorece a dispersão do ácido palmítico, mecanismo que corrobora achados de estudos anteriores (Behiry, 2013; Pasandín; Pérez, 2015; Carvalho *et al.*, 2023), os quais

evidenciam melhorias na resistência à umidade em misturas asfálticas incorporadas com cargas minerais simples, como cinza volante ou agregados naturais moídos. Adicionalmente, alguns autores (Hesami *et al.*, 2013; Al-Tameemi; Wang; Albayati, 2016; Grajales *et al.*, 2021) apontam que a incorporação de cal como fíler potencializa a resistência da mistura aos danos por umidade, inclusive em composições recicladas com adição de óleos vegetais (de Medeiros Melo Neto *et al.*, 2023b; Carvalho *et al.*, 2024; da Costa *et al.*, 2024; Capitão; de Picado-Santos; Marques Almeida, 2025).

Em um estudo prévio, Silva Pinheiro *et al.* (2014) obtiveram valores de caracteriza um valor de pH de 5,45 e densidade de 0,90 g/mL para o óleo de copaíba, valores semelhantes aos verificados no óleo de babaçu neste estudo. Melo Neto *et al.* (2022), ao incorporar óleo de copaíba ao ligante asfáltico PEN 50/70, observaram uma redução na temperatura de desempenho (PG) de 64 °C para 58 °C com a adição de 4% e 5% de óleo, respectivamente. Diante disso, infere-se que o óleo de babaçu apresenta potencial para induzir efeito amaciante semelhante ao reportado por esses autores. No entanto, destaca-se que o referido estudo não contemplou a avaliação do desempenho de misturas asfálticas formuladas com os ligantes modificados, tampouco a análise da susceptibilidade à umidade.

3.1.3. RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP)

Nesta pesquisa foram avaliados dois ligantes recuperados de RAP distintos para investigar se os efeitos do óleo são similares em RAP provenientes de fontes diferentes. O primeiro ligante recuperado, identificado como RA1, é proveniente de uma operação de fresagem realizada em uma rodovia brasileira localizada no Km 15 da BR230, na região Nordeste do Brasil, caracterizada por clima tropical e elevadas temperaturas durante o verão. O segundo ligante recuperado, designado como RA2, foi derivado de um RAP obtido por meio da fresagem de um trecho da BR-230, localizado no estado da Paraíba. De acordo com os dados fornecidos pelo DNIT, esse material é composto por uma mistura de asfalto modificado por polímero, resultante da combinação de mistura asfáltica à quente e microrrevestimento. A Figura 7 ilustra os RAPs utilizados neste estudo.

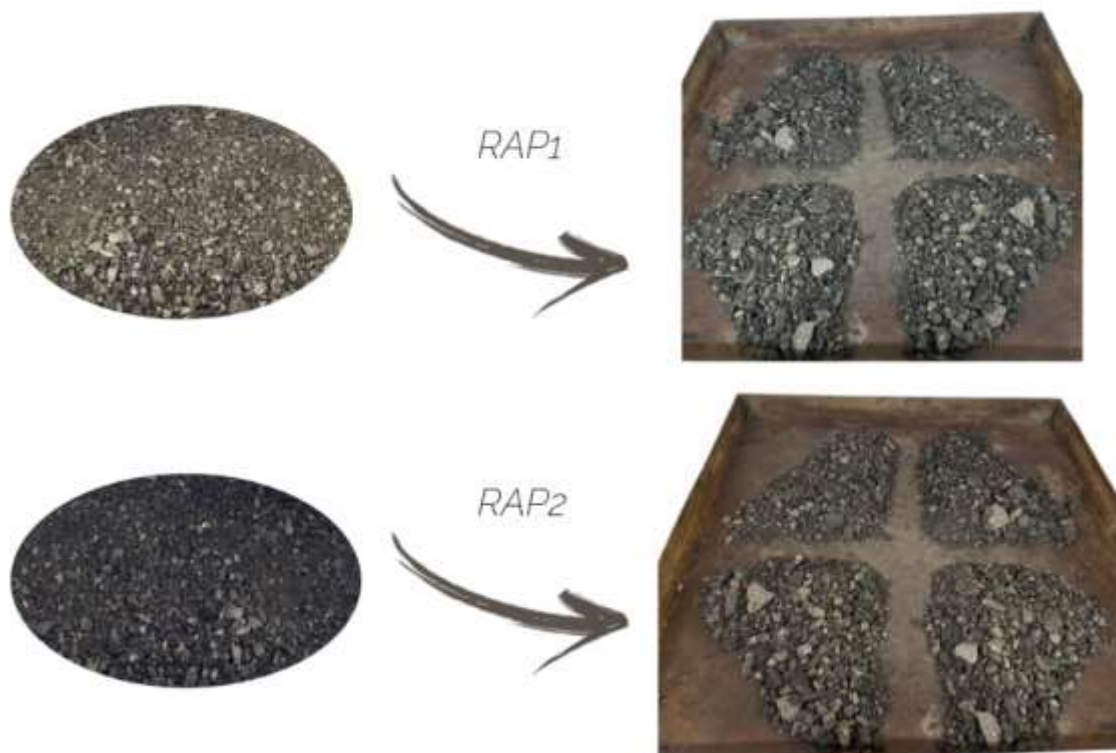


Figura 7 - RAPs utilizados nesse estudo.

A extração dos ligantes asfálticos presentes nos RAPs foi conduzida com o objetivo de caracterizá-los fisicamente, quimicamente e reologicamente. O ensaio de extração foi realizado por meio do modelo de centrífuga elétrica, conhecido como Rotarex, seguindo as diretrizes estabelecidas pela norma ASTM D2172 (2017), de maneira análoga ao realizado nos estudos de Melo Neto *et al.* (2022) e da Costa *et al.* (2024). O solvente utilizado foi o percloroetileno, cuja temperatura de ebulição é de 121°C, conforme preconizado pela norma ASTM D2172 (2017).

A metodologia do ensaio foi executada em conformidade com as normas mencionadas, tendo como base a extração do ligante asfáltico conforme descrito nos estudos de Gonçalves *et al.* (2020) e Costa *et al.* (2023a). As amostras foram submetidas a uma permanência de 1 hora em estufa a 110°C. Após esse período, as amostras foram desagregadas e pesadas no prato da centrífuga. Subsequentemente à pesagem, o material foi completamente imerso pelo solvente, e após um intervalo de 15 minutos, a centrífuga foi fechada, já contendo o papel filtro. A centrifugação foi iniciada, e assim que o solvente inicialmente adicionado à amostra foi completamente extraído, foram adicionados mais 200

ml do diluente, em passos sucessivos, até que o solvente fosse completamente clarificado, seguindo rigorosamente as diretrizes da norma. Os teores de ligante obtidos no ensaio de extração foram de 5,5% para o RAP1 e 5,3% para o RAP2.

A recuperação do ligante asfáltico oxidado presente no RAP foi conduzida por meio de um evaporador rotativo a uma temperatura de aproximadamente $60^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, durante cerca de 2 horas, sob vácuo de 0.035 mmHg. A sequência operacional foi a seguinte: (i) introdução de 200 ml de material no balão, (ii) início da rotação média e acionamento do vácuo a uma temperatura de 50°C , (iii) elevação gradual da temperatura à medida que o percloroetileno é evaporado e condensado, atingindo a temperatura de 70°C , e (iv) após atingir 70°C , manter a rotaevaporação por aproximadamente 1 hora. A Figura 8 apresenta o rotaevaporador que foi utilizado no processo de recuperação do ligante asfáltico do RAP.



Figura 8 - Processo de recuperação dos ligantes asfálticos no rotaevaporador.

Os ligantes asfálticos recuperados RA1 e RA2 apresentaram a mesma classificação PG de 76-XX, com temperaturas máximas de PG para esses ligantes de 78°C e 81°C , respectivamente. Devido à semelhança nos valores de PG desses ligantes, espera-se que os efeitos da adição do óleo de babaçu nestes também sejam similares, apesar das diferenças em sua constituição.

3.2. MÉTODOS EXPERIMENTAIS

A metodologia de análise desenvolvida neste capítulo foi dividida em duas etapas para proporcionar clareza nos procedimentos laboratoriais e estabelecer uma sequência lógica alinhada aos objetivos específicos. As etapas foram delineadas da seguinte maneira:

Análise I: Esta etapa foi subdividida em dois cenários. No cenário I, foram realizadas análises físicas, químicas e reológicas de amostras de ligante asfáltico virgem com óleo de babaçu, considerando condições não envelhecidas, envelhecidas a curto prazo e envelhecidas a longo prazo. No cenário II, avaliou-se quimicamente e reologicamente amostras de ligante asfáltico envelhecido a longo prazo rejuvenescidas com a adição direta de óleo de babaçu e com a incorporação de ligante virgem contendo óleo de babaçu em sua constituição.

Análise II: Investigação dos efeitos reológicos e químicos em amostras de ligantes asfálticos recuperados de RAP1 e RAP2, modificadas com ligante asfáltico virgem contendo óleo de babaçu.

3.2.1. ANÁLISE I

3.2.1.1. CENÁRIO I

Devido à lacuna sobre o óleo de babaçu como agente modificador do ligante asfáltico PEN 50/70, optou-se por testar diferentes teores para avaliar os efeitos na viscosidade, rigidez e resistência do ligante. Assim, foram conduzidos testes com teores de 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 7%, 10% e 12%. A literatura apresenta teores semelhantes em testes com outros óleos vegetais no ligante asfáltico PEN 50/70, tais como 1% a 6% de óleo de linhaça (Silva *et al.*, 2022); 4% e 5% de óleo de copaíba (Neto *et al.*, 2022); 1%, 3% e 5% com ácido graxo da borra do óleo de soja em ligante PEN 50/70, e 3%, 5%, 7%, 10%, 15% e 20% em ligante envelhecido recuperado (de Medeiros Melo Neto *et al.*, 2023c); bem como 2%, 4%, 6%, 8%, 10% e 12% de óleo de algodão bruto (da Costa *et al.*, 2024).

O processo de modificação do ligante asfáltico com o óleo de babaçu seguiu um protocolo semelhante aos estudos conduzidos por Neto *et al.* (2022), Melo Neto *et al.* (2023c) e Costa *et al.* (2024). As etapas realizadas incluíram: (i) aquecimento do ligante asfáltico PEN 50/70 a 130°C, (ii) acionamento do agitador mecânico modelo Fisatom 752A a 600 rpm, mantendo a temperatura de 130°C, (iii) adição gradual do óleo de babaçu em cada proporção em peso do ligante, e (iv) manutenção da agitação e do aquecimento por 20 minutos. Ao final do processo, observou-se homogeneidade nas amostras de ligante modificado, sem a presença de grumos, indicando compatibilidade entre os materiais. As amostras modificadas com o óleo de babaçu foram devidamente separadas, identificadas e submetidas a ensaios de caracterização física e reológica.

As amostras de ligante asfáltico, tanto puro quanto modificado com o óleo de babaçu, foram submetidas aos seguintes ensaios característicos:

- (i) Penetração (ASTM D5/D5M, 2020): O ensaio é realizado para determinar a consistência do ligante asfáltico, fornecendo informações sobre sua dureza e resistência à deformação sob diversas condições de temperatura.
- (ii) Ponto de amolecimento (ASTM D36, 2020): Mensura a temperatura na qual o ligante asfáltico atinge uma consistência específica. Este teste é realizado para avaliar a faixa de temperatura na qual o ligante começa a amolecer e se torna mais suscetível à deformação.
- (iii) Viscosidade rotacional (ASTM D 4402, 2023): Mede a viscosidade do ligante asfáltico em diferentes taxas de cisalhamento. Este teste fornece informações sobre a fluidez do ligante e sua capacidade de fluir sob diferentes condições de temperatura e carga.
- (iv) *Performance Grade* – PG (ASTM D6373, 2021): Utilizado para categorizar ligantes asfálticos com base em suas características de desempenho em diversas temperaturas. Ele fornece informações sobre a faixa de temperatura dentro da qual o ligante pode funcionar efetivamente em aplicações em pavimentos. A partir dos resultados deste ensaio é possível calcular o Índice de Envelhecimento (IE). Este índice relaciona o parâmetro $G^*/\sin\delta$ do ligante antes e depois do envelhecimento a uma determinada temperatura, de acordo com a Equação (1). Esta abordagem permite a avaliação da suscetibilidade do material ao envelhecimento. As amostras de ligante usadas têm 25 mm de diâmetro e 1

mm de espessura, antes e depois da aplicação dos processos de envelhecimento combinados.

$$IE = \frac{\frac{G^*}{\text{sen}\delta}(\text{não envelhecida})}{\frac{G^*}{\text{sen}\delta}(\text{envelhecida})} \quad (1)$$

Com base nos resultados do módulo de cisalhamento dinâmico (G^*) e do ângulo de fase (δ), o parâmetro *Glover-Rowe* (G-R) (Rowe; King; Anderson, 2014) dos ligantes asfálticos foi determinado, pois é um parâmetro adequado para medir o desempenho de durabilidade dos pavimentos asfálticos em campo (Makowska; Aromaa; Pellinen, 2017; Ogbo *et al.*, 2019; Hu *et al.*, 2024). No Brasil, as temperaturas são altas devido ao seu clima tropical. Nas regiões norte e nordeste, as temperaturas máximas alcançam cerca de 32°C, enquanto na região centro-oeste, no verão, as temperaturas podem chegar a 40°C. Portanto, o cálculo do parâmetro G-R foi realizado a uma temperatura de 40°C para as amostras da Análise I e 46°C para as amostras da Análise II e uma frequência de 10 rad/s, conforme mostrado na Equação (2). Elkashef *et al.* (2018a) e Oldham *et al.* (2021) também realizaram a análise desse parâmetro em altas temperaturas (44,7°C).

$$G - R = \frac{G^*(\cos\delta)^2}{\text{sen}\delta} \quad (2)$$

- (v) *Multiple Stress Creep Recovery* – MSCR (ASTM D7405, 2020): Analisa a capacidade do ligante asfáltico de se recuperar de deformações quando submetido a vários níveis de tensão e temperaturas. Este teste fornece dados sobre a resistência do ligante à deformação permanente, permitindo previsões do seu desempenho em condições reais de tráfego. As amostras de ligante asfáltico foram testadas na temperatura máxima de PG específica de cada amostra e na temperatura máxima de PG do ligante asfáltico não modificado, considerando condições envelhecidas a curto e longo prazo.
- (vi) *Rolling Thin-Film Oven* – RTFO (ASTM D2872, 2019): Promove o envelhecimento do ligante asfáltico à oxidação sob altas temperaturas e ar em movimento, simulando o envelhecimento durante a produção e aplicação do asfalto. Uma película fina de ligante é submetida a condições controladas em um forno de rolos, monitorando mudanças físicas e químicas ao longo do tempo. Fornece dados essenciais sobre a resistência à oxidação, facilitando o desenvolvimento de misturas asfálticas duráveis e de alto desempenho.

(vii) *Fourier-Transform Infrared Spectroscopy* – FTIR (ASTM E1252, 2021): O equipamento utilizado será um Espectrômetro Bruker Vertex 70 com sonda de Refletância Total Atenuada (RTA), na faixa de 4.000 a 500 cm^{-1} , registrando os sinais em transmitância ou absorvância. Este procedimento permite identificar alterações na composição química dos ligantes após a adição dos aditivos e processos de envelhecimento. Independentemente do tipo de ligante, processo de envelhecimento ou nível de degradação, a técnica infravermelha é valiosa para avaliar o grau de oxidação das amostras.

Todas as amostras foram submetidas aos ensaios supracitados, tanto antes quanto após a realização do ensaio RTFO (ASTM D2872, 2019). Este ensaio foi conduzido a uma temperatura de 163°C ao longo de 85 minutos, padrão para ligantes asfálticos convencionais não modificados, conforme as diretrizes normativas.

As temperaturas associadas aos processos de mistura e compactação são intrinsecamente ligadas à alteração de viscosidade decorrente da introdução de óleos vegetais. Assim, é crucial avaliar se houve redução dessas temperaturas para os diferentes teores avaliados. A temperatura de projeto do ligante asfáltico, utilizada na produção de misturas asfálticas, deve atender a uma faixa de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s, conforme determinado pelo viscosímetro rotacional. Isso se justifica pela incorporação de óleos vegetais, resultando em ligantes mais fluidos e potencialmente mais suscetíveis ao envelhecimento térmico. Este procedimento de adição de óleos não apenas facilita a obtenção de temperaturas de trabalho mais moderadas durante os estágios de mistura e compactação, mas também contribui para a concepção de misturas frequentemente caracterizadas como mornas.

As temperaturas de mistura foram determinadas para cada amostra modificada por meio do ensaio de viscosidade rotacional, e adicionou-se 10°C correspondente à temperatura dos agregados graníticos no processo de produção de misturas asfálticas à quente. Este valor foi considerado como a temperatura a ser empregada no processo de envelhecimento tanto a curto como a longo prazo.

O equipamento PAV (*Pressure Aging Vessel*) ocasiona ao ligante asfáltico um envelhecimento de longo prazo. Neste processo, a amostra de ligante asfáltico é exposta ao calor e à pressão para simular o envelhecimento em serviço ao longo de um período de 7 a 10 anos. Diante disso, visando simular amostras envelhecidas de ligantes asfálticos, como os presentes no RAP, buscou-se uma metodologia alternativa para o envelhecimento a longo

prazo do ligante asfáltico PEN 50/70 que pudesse representar o envelhecimento PAV e, consequentemente, um ligante envelhecido semelhante ao presente no RAP.

O método empregado neste estudo foi proposto por Subbarao Nagabhushanarao e Vijayakumar (2021), os quais conduziram um experimento com o propósito de obter um ligante asfáltico com envelhecimento acelerado a longo prazo, semelhante ao método PAV (*Pressure Aging Vessel*). O processo consiste na realização de vários ciclos de envelhecimento RTFO a 163°C, sendo que cada ciclo tem a duração de 85 minutos. Para obter um ligante asfáltico envelhecido rapidamente, utilizando o ensaio RTFO (ASTM D2872, 2019), optou-se por submeter as amostras a 5 horas e 20 minutos no RTFO, como uma alternativa ao teste PAV a 100°C por 20 horas, conforme especificado em ASTM D6521 (2022) (Subbarao Nagabhushanarao; Vijayakumar, 2021).

As temperaturas deste ensaio foram as mesmas utilizadas para cada amostra de ligante no ensaio de envelhecimento a curto prazo RTFO. Essa abordagem pode ser particularmente útil em laboratórios que possuem restrições na realização do ensaio PAV, permitindo uma análise mais abrangente do envelhecimento de ligantes asfálticos em curto e longo prazo.

As amostras de ligante asfáltico puro e modificado, após o processo de envelhecimento a longo prazo (denominado LTA, do inglês *Long-Term Aged*), foram submetidas individualmente a um período de 5 horas e 20 minutos de envelhecimento RTFO. Posteriormente, essas amostras foram avaliadas reologicamente por meio dos ensaios de PG e MSCR e quimicamente por meio do ensaio FTIR.

3.2.1.2. CENÁRIO II

A metodologia *Blending Chart* é amplamente empregada no processo de dosagem de misturas asfálticas recicladas. Os dados resultantes da caracterização do ligante asfáltico, modificado pelos agentes redutores de viscosidade, foram utilizados para determinar o teor ideal de RAP a ser incorporado na dosagem da mistura asfáltica reciclada. O método B, conforme descrito no NCHRP *Report* 452 (2001), é empregado nesta metodologia, utilizando os dados de *Performance Grade* (PG) tanto do ligante asfáltico modificado quanto do ligante asfáltico recuperado do RAP.

Quando se busca incorporar RAP à mistura asfáltica em teores superiores a 30%, torna-se imperativo empregar um ligante asfáltico virgem com viscosidade adequada para desempenhar o papel de “amolecer” e “rejuvenescer” o ligante envelhecido presente no RAP. Nesse contexto, o óleo de babaçu foi empregado como aditivo redutor de viscosidade e de PG no ligante asfáltico PEN 50/70, com o intuito de otimizar o teor de RAP a ser incorporado à mistura asfáltica.

A amostra de ligante asfáltico puro, após o período de envelhecimento a longo prazo LTA, representa um possível ligante asfáltico recuperado do RAP. Essa abordagem possibilita a implementação de um programa experimental de testes reológicos para avaliar a influência da adição dos aditivos no ligante envelhecido em condições distintas. Isso pode viabilizar a incorporação do aditivo na produção de misturas asfálticas recicladas. Nesse contexto, foram investigadas duas situações diferentes:

- (1) Ligante asfáltico puro envelhecido a longo prazo (LTA) com adição direta do óleo de babaçu: realizou-se a incorporação direta do óleo ao ligante envelhecido, seguindo as proporções testadas em relação ao peso do ligante asfáltico LTA.
- (2) Ligante asfáltico puro envelhecido a longo prazo (LTA) com adição de ligante asfáltico modificado com óleo de babaçu. Nesse processo, consideraram-se premissas específicas:
 - (i) Utilização apenas de amostras de ligante PEN 50/70 modificado com o óleo de babaçu que resultaram em redução do PG;
 - (ii) Aplicação da metodologia *Blending Chart*, método B (NCHRP Report 452, 2001), em cada amostra de ligante modificado para simular o teor de RAP a ser adicionado na mistura reciclada e determinar a proporção de ligante virgem a ser incorporada;
 - (iii) Consideração de um teor de ligante envelhecido presente no RAP de 5%, conforme média de projeto em misturas asfálticas convencionais (Cruz *et al.*, 2022; Beserra Costa *et al.*, 2023a);
 - (iv) Aceitação de um teor de projeto de ligante asfáltico na mistura convencional, que apresenta características semelhantes ao esqueleto pétreo da mistura reciclada, de 5% (de Medeiros Melo Neto *et al.*, 2022);

(v) Escolha de uma ativação de 70% do ligante asfáltico presente no RAP com o ligante virgem adicionado, considerando que a ativação do ligante varia entre 60% e 100% (Wellner *et al.*, 2015).

Com os dados de PG obtidos para cada teor de óleo de babaçu testado, foi construído o *Blending Chart* para determinar os percentuais de RAP a serem adicionados nas misturas asfálticas recicladas, considerando uma temperatura final de PG de 64°C, equivalente ao do ligante asfáltico puro PEN 50/70. A Figura 9 ilustra o gráfico com os teores de RAP para cada amostra de ligante modificado pelo óleo de babaçu que apresentou PG contínuo inferior a 65°C.

A partir dos teores de RAP obtidos no gráfico da Figura 9, foram determinados os percentuais de ligante virgem modificado com óleo de babaçu necessários para as misturas asfálticas recicladas, conforme as premissas apontadas anteriormente. A Tabela 3 apresenta as proporções de cada ligante, considerando o teor de projeto de ligante asfáltico de 5%, bem como as proporções totais a serem consideradas no processo de mistura dos ligantes, de forma isolada, no programa experimental para obtenção dos dados reológicos.

Observa-se que, à medida que se adiciona o óleo de babaçu no ligante modificado, menor é a quantidade de ligante virgem a ser adicionada. Esse comportamento é atribuído ao efeito amolecedor que o óleo exerce sobre o ligante asfáltico, indicando uma tendência de redução do consumo de ligante asfáltico na produção das misturas asfálticas recicladas. Estudos anteriores, como os de Melo Neto *et al.* (2022, 2023b) e Costa *et al.* (2024), corroboram esse padrão de redução no consumo de ligante asfáltico em misturas recicladas, apontando para uma economia de custos na produção dessas misturas.

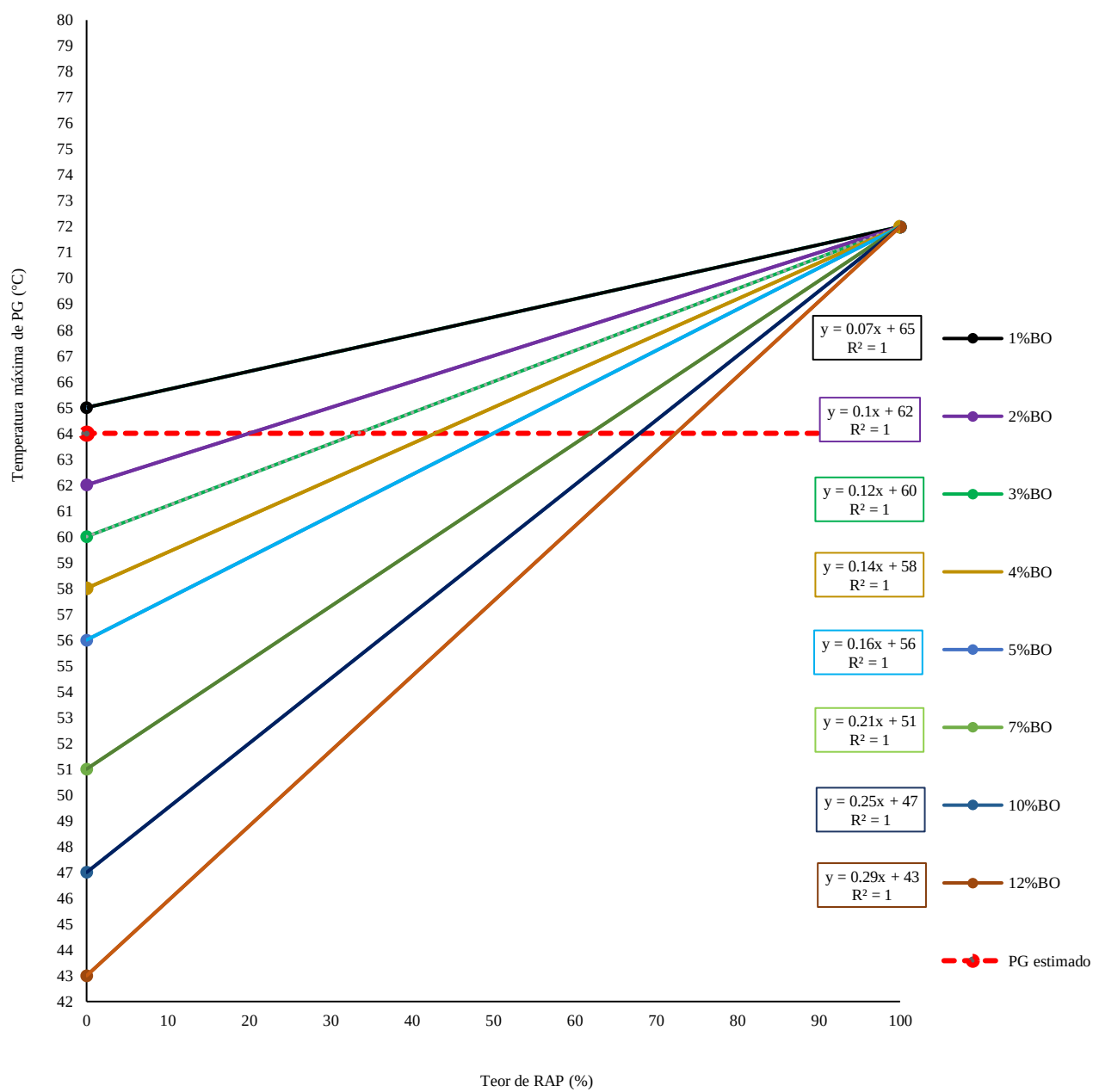


Figura 9 - Blending Chart para os ligantes modificados com óleo de babaçu.

Tabela 3 - Proporção dos ligantes asfálticos na mistura reciclada.

Definição das proporções de cada ligante asfáltico					Composição final da quantidade de cada ligante na amostra modificada		
2%BO e 20% de RAP	5% de 20% de RAP	70% de interação do ligante RAP disponível	Teor de ligante virgem modificado necessário (%)	Ligante total na mistura reciclada (%)	Ligante virgem com BO (%)	Ligante RAP (LTA) (%)	Ligante Final (%)
	1,000	0,700	4,300	5,0	86,00	14,0	100,0
3%BO e 33% de RAP	5% de 33% de RAP	70% de interação do ligante RAP disponível	Teor de ligante virgem necessário (%)	5,0	Ligante virgem com BO (%)	Ligante RAP (LTA) (%)	Ligante Final (%)
	1,650	1,155	3,845		76,9	23,1	100,0
4%BO e 43% de RAP	5% de 43% de RAP	70% de interação do ligante RAP disponível	Teor de ligante virgem necessário (%)	5,0	Ligante virgem com BO (%)	Ligante RAP (LTA) (%)	Ligante Final (%)
	2,150	1,505	3,495		69,9	30,1	100,0
5%BO e 50% de RAP	5% de 50% de RAP	70% de interação do ligante RAP disponível	Teor de ligante virgem necessário (%)	5,0	Ligante virgem com BO (%)	Ligante RAP (LTA) (%)	Ligante Final (%)
	2,500	1,750	3,250		65,0	35,0	100,0
7%BO e 62% de RAP	5% de 62% de RAP	70% de interação do ligante RAP disponível	Teor de ligante virgem necessário (%)	5,0	Ligante virgem com BO (%)	Ligante RAP (LTA) (%)	Ligante Final (%)
	3,100	2,170	2,830		56,6	43,4	100,0
10%BO e 68% de RAP	5% de 68% de RAP	70% de interação do ligante RAP disponível	Teor de ligante virgem necessário (%)	5,0	Ligante virgem com BO (%)	Ligante RAP (LTA) (%)	Ligante Final (%)
	3,400	2,380	2,620		52,4	47,6	100,0
12%BO e 72% de RAP	5% de 72% de RAP	70% de interação do ligante RAP disponível	Teor de ligante virgem necessário (%)	5,0	Ligante virgem com BO (%)	Ligante RAP (LTA) (%)	Ligante Final (%)
	3,600	2,520	2,480		49,6	50,4	100,0

3.2.1.3. NOMENCLATURA DAS AMOSTRAS

As amostras de ligante asfáltico puro e modificado, tanto antes quanto após os processos de envelhecimento, receberam designações de acordo com o aditivo (óleo de babaçu) incorporado ao ligante, como indicado na Tabela 4. Essas designações foram empregadas de forma consistente ao longo do texto para identificar as amostras correspondentes, inclusive na seção de resultados.

Tabela 4 - Nomenclatura das amostras de ligante asfáltico.

Ligantes virgens		Ligantes envelhecidos a curto prazo (RTFO)	
PEN 50/70	Ligante asfáltico puro	PEN 50/70 - RTFO	Ligante asfáltico puro após RTFO
PEN 50/70 + 1%BO	Ligante asfáltico + 1% de óleo de babaçu	PEN 50/70 + 1%BO - RTFO	Ligante asfáltico + 1% de óleo de babaçu após RTFO
PEN 50/70 + 2%BO	Ligante asfáltico + 2% de óleo de babaçu	PEN 50/70 + 2%BO - RTFO	Ligante asfáltico + 2% de óleo de babaçu após RTFO
PEN 50/70 + 3%BO	Ligante asfáltico + 3% de óleo de babaçu	PEN 50/70 + 3%BO - RTFO	Ligante asfáltico + 3% de óleo de babaçu após RTFO
PEN 50/70 + 4%BO	Ligante asfáltico + 4% de óleo de babaçu	PEN 50/70 + 4%BO - RTFO	Ligante asfáltico + 4% de óleo de babaçu após RTFO
PEN 50/70 + 5%BO	Ligante asfáltico + 5% de óleo de babaçu	PEN 50/70 + 5%BO - RTFO	Ligante asfáltico + 5% de óleo de babaçu após RTFO
PEN 50/70 + 7%BO	Ligante asfáltico + 7% de óleo de babaçu	PEN 50/70 + 7%BO - RTFO	Ligante asfáltico + 7% de óleo de babaçu após RTFO
PEN 50/70 + 10%BO	Ligante asfáltico + 10% de óleo de babaçu	PEN 50/70 + 10%BO - RTFO	Ligante asfáltico + 10% de óleo de babaçu após RTFO
PEN 50/70 + 12%BO	Ligante asfáltico + 12% de óleo de babaçu	PEN 50/70 + 12%BO - RTFO	Ligante asfáltico + 12% de óleo de babaçu após RTFO
PEN 50/70 + 3%AFA	Ligante asfáltico + 3% de ácido graxo animal	PEN 50/70 + 3%AFA - RTFO	Ligante asfáltico + 3% de ácido graxo animal após RTFO
PEN 50/70 + 5%AFA	Ligante asfáltico + 5% de ácido graxo animal	PEN 50/70 + 5%AFA - RTFO	Ligante asfáltico + 5% de ácido graxo animal após RTFO
PEN 50/70 + 7%AFA	Ligante asfáltico + 7% de ácido graxo animal	PEN 50/70 + 7%AFA - RTFO	Ligante asfáltico + 7% de ácido graxo animal após RTFO
Ligantes envelhecidos a longo prazo (LTA)		Ligante PEN 50/70 – LTA + adição direta de óleo de babaçu (Cenário I)	
PEN 50/70 - LTA	Ligante asfáltico puro após LTA	PEN 50/70 - LTA + 2%BO	Ligante asfáltico puro após LTA + 2% de óleo de babaçu
PEN 50/70 + 1%BO - LTA	Ligante asfáltico + 1% de óleo de babaçu após LTA	PEN 50/70 - LTA + 3%BO	Ligante asfáltico puro após LTA + 3% de óleo de babaçu
PEN 50/70 + 2%BO - LTA	Ligante asfáltico + 2% de óleo de babaçu após LTA	PEN 50/70 - LTA + 4%BO	Ligante asfáltico puro após LTA + 4% de óleo de babaçu
PEN 50/70 + 3%BO - LTA	Ligante asfáltico + 3% de óleo de babaçu após LTA	PEN 50/70 - LTA + 5%BO	Ligante asfáltico puro após LTA + 5% de óleo de babaçu
PEN 50/70 + 4%BO - LTA	Ligante asfáltico + 4% de óleo de babaçu após LTA	PEN 50/70 - LTA + 7%BO	Ligante asfáltico puro após LTA + 7% de óleo de babaçu
PEN 50/70 + 5%BO - LTA	Ligante asfáltico + 5% de óleo de babaçu após LTA	PEN 50/70 - LTA + 10%BO	Ligante asfáltico puro após LTA + 10% de óleo de babaçu
PEN 50/70 + 7%BO - LTA	Ligante asfáltico + 7% de óleo de babaçu após LTA	PEN 50/70 - LTA + 12%BO	Ligante asfáltico puro após LTA + 12% de óleo de babaçu
PEN 50/70 + 10%BO - LTA	Ligante asfáltico + 10% de óleo de babaçu após LTA		
PEN 50/70 + 12%BO - LTA	Ligante asfáltico + 12% de óleo de babaçu após LTA		
Ligante PEN 50/70 - LTA + adição de ligante modificado por óleo de babaçu (Cenário II)			
PEN 50/70 - LTA + PEN 5070 + 2%BO	Ligante asfáltico puro após LTA + Ligante asfáltico com 2% de óleo de babaçu		
PEN 50/70 - LTA + PEN 5070 + 3%BO	Ligante asfáltico puro após LTA + Ligante asfáltico com 3% de óleo de babaçu		
PEN 50/70 - LTA + PEN 5070 + 4%BO	Ligante asfáltico puro após LTA + Ligante asfáltico com 4% de óleo de babaçu		
PEN 50/70 - LTA + PEN 5070 + 5%BO	Ligante asfáltico puro após LTA + Ligante asfáltico com 5% de óleo de babaçu		
PEN 50/70 - LTA + PEN 5070 + 7%BO	Ligante asfáltico puro após LTA + Ligante asfáltico com 7% de óleo de babaçu		
PEN 50/70 - LTA + PEN 5070 + 10%BO	Ligante asfáltico puro após LTA + Ligante asfáltico com 10% de óleo de babaçu		
PEN 50/70 - LTA + PEN 5070 + 12%BO	Ligante asfáltico puro após LTA + Ligante asfáltico com 12% de óleo de babaçu		

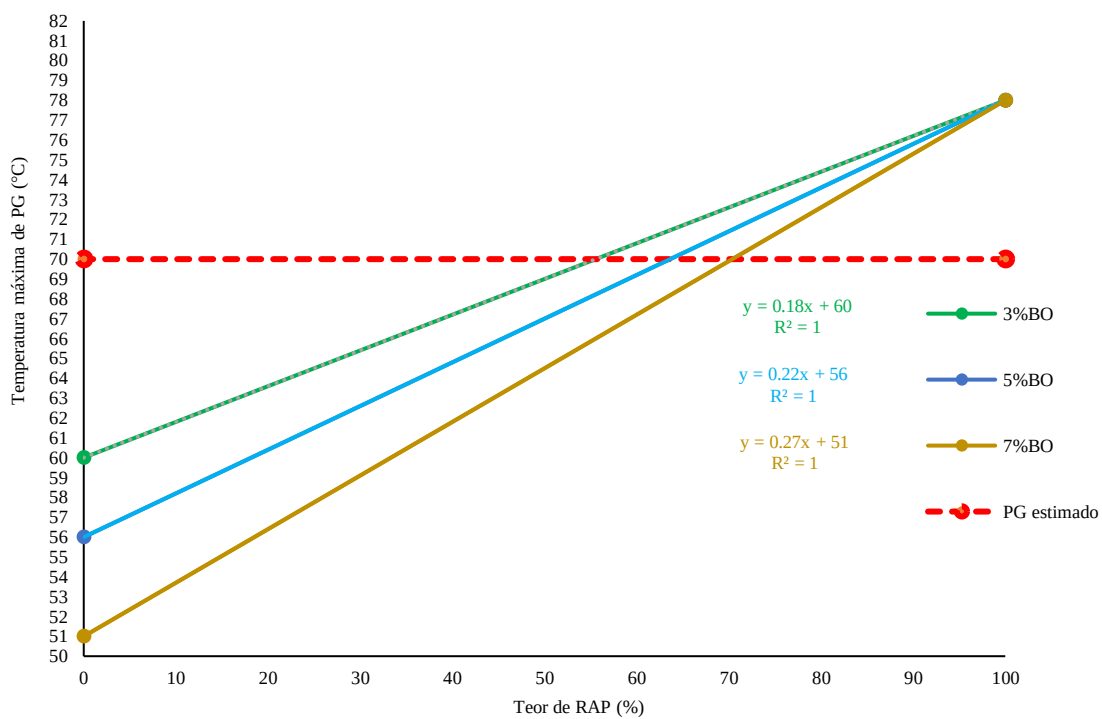
3.2.2. ANÁLISE II

Este estudo analisou a adição do ligante asfáltico modificado com óleo de babaçu em ligantes asfálticos recuperados do RAP, para validar os efeitos rejuvenescedores do óleo de babaçu no ligante asfáltico envelhecido. A análise visou investigar os efeitos reológicos e químicos após a modificação, com o intuito de estimar os impactos que serão observados na mistura asfáltica reciclada.

Os teores de óleo de babaçu selecionados foram de 3%, 5% e 7%, conforme análise reológica detalhada na seção de resultados, obtendo valores de PG contínuo de 60°C, 56°C e 51°C, respectivamente. A determinação desses teores considerou a obtenção de teores de RAP superiores a 50% pelo método *blending chart* (Figura 10) para uma temperatura de PG estimada de 70°C, uma vez que o desempenho mecânico de misturas recicladas tende a ser comprometido à medida que maior teor de RAP é adicionado às misturas (Beserra Costa *et al.*, 2023a). Devido ao crescente aumento da temperatura média no Brasil, optou-se por um PG estimado superior a 64°C.

Após a análise dos gráficos fornecidos na Figura 10 os percentuais de ligante virgem modificado com óleo de babaçu necessários para as misturas asfálticas recicladas foram determinados, considerando os teores de ligante obtidos no ensaio de extração, que foram de 5,5% para o RA1 e 5,3% para o RA2. A Tabela 5 apresenta as proporções de cada ligante, considerando o teor de projeto de ligante asfáltico de 4,75%, conforme o teor de ligante de projeto obtido para a mistura asfáltica de controle (0%RAP) no Capítulo III, além das proporções totais a serem consideradas no processo de mistura dos ligantes.

(a)



(b)

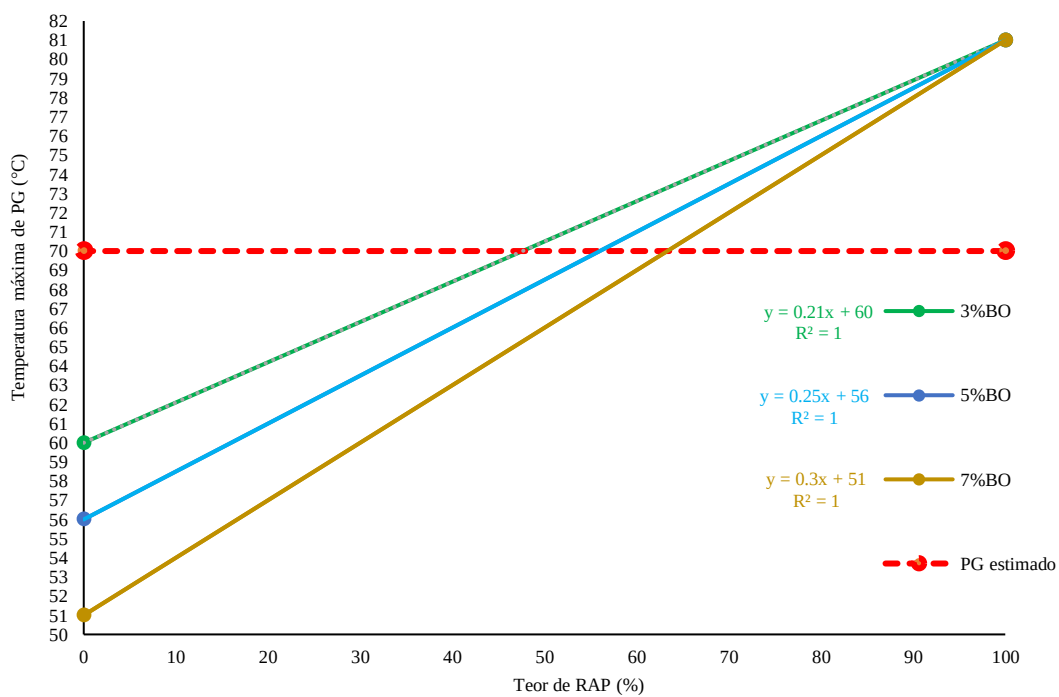


Figura 10 - Blending charts para misturas recicladas: (a) RA1, (b) RA2.

Tabela 5 - Proporção dos ligantes asfálticos na mistura reciclada com os diferentes RAPs.

Definição das proporções de cada ligante asfáltico					Composição final da quantidade de cada ligante na amostra		
3%BO e 56% de RAP 1	5,5% de 56% de RAP	70% de interação do ligante de RAP disponível	Teor de ligante virgem necessário (%)	Ligante total (%)	Ligante virgem com BO (%)	Ligante recuperado (%)	Ligante Final (%)
	3,080	2,156	2,594	4,750	54,61	45,39	100,00
5%BO e 63% de RAP 1	5,5% de 63% de RAP	70% de interação do ligante de RAP disponível	Teor de ligante virgem necessário (%)	4,750	48,94	51,06	100,00
	3,465	2,426	2,325				
7%BO e 70% de RAP 1	5,5% de 70% de RAP	70% de interação do ligante de RAP disponível	Teor de ligante virgem necessário (%)	4,750	43,26	56,74	100,00
	3,850	2,695	2,055				
3%BO e 48% de RAP 2	5,3% de 48% de RAP	70% de interação do ligante de RAP disponível	Teor de ligante virgem necessário (%)	4,750	62,51	37,49	100,00
	2,544	1,781	2,969				
5%BO e 56% de RAP 2	5,3% de 56% de RAP	70% de interação do ligante de RAP disponível	Teor de ligante virgem necessário (%)	4,750	56,26	43,74	100,00
	2,968	2,078	2,672				
7%BO e 63% de RAP 2	5,3% de 63% de RAP	70% de interação do ligante de RAP disponível	Teor de ligante virgem necessário (%)	4,750	50,79	49,21	100,00
	3,339	2,337	2,413				

As amostras dos ligantes asfálticos recuperados modificados foram identificadas com base no tipo de ligante recuperado e no tipo de ligante virgem modificado adicionado:

(i) Amostras de ligante asfáltico recuperado 1 (RA1): [RA1 + (PEN 50/70 + 3% BO)]; [RA1 + (PEN 50/70 + 5% BO)]; [RA1 + (PEN 50/70 + 7% BO)].

(ii) Amostras de ligante asfáltico recuperado 2 (RA2): [RA2 + (PEN 50/70 + 3% BO)]; [RA2 + (PEN 50/70 + 5% BO)]; [RA2 + (PEN 50/70 + 7% BO)].

As amostras de ligante asfáltico recuperado, tanto puro quanto modificado com óleo de babaçu, foram submetidas a ensaios reológicos de *Performance Grade* (PG) (ASTM D6373, 2021), *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR) (ASTM D7405, 2020) e *Linear Amplitude Sweep* (LAS) (AASHTO T 391, 2020). A caracterização química foi realizada por meio do ensaio de *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) (ASTM E1252, 2021). A metodologia utilizada nos ensaios de PG, MSCR e FTIR seguiu os procedimentos descritos na seção 2.1.1.

O ensaio LAS (AASHTO T 391, 2020) foi conduzido devido à tendência dos ligantes asfálticos envelhecidos de apresentarem maior rigidez e possivelmente maior suscetibilidade

ao dano por fadiga. Esse teste envolve a aplicação de carregamento cíclico reversível que aumenta a amplitude de deformação sob uma frequência constante de maneira sistemática. Ele é dividido em duas etapas: na primeira, as amostras são submetidas a uma varredura de frequência de 0,2 a 30 Hz, com uma deformação controlada de 0,1%, para determinar as propriedades reológicas na região de viscoelasticidade linear. Na segunda etapa, realiza-se uma varredura de amplitude para medir o dano sofrido pelo ligante, com um incremento linear variando de 0,1 a 30% ao longo de 300 ciclos de carga, em um intervalo de 300 segundos.

Nesta fase, pequenos torques foram aplicados à mesma amostra sob uma frequência de 10 Hz. A cada 10 ciclos de carga, foram registrados os valores de tensão de cisalhamento aplicada, assim como os valores de ângulo de fase e módulo complexo. Os dados obtidos nesse procedimento são utilizados para calcular o índice de tolerância ao dano por fadiga e os coeficientes do modelo de fadiga ($Nf = A \times \gamma_{\text{máx}}^B$), onde Nf é o número de ciclos até a ruptura, γ é a deformação, e os parâmetros A e B são constantes. O critério de falha adotado no ensaio foi baseado na abordagem energética, usando a energia de pseudo-deformação

Neste teste, foram preparadas amostras com 8 mm de diâmetro e 2 mm de espessura. A norma AASHTO T 391 (2020) especifica que as amostras devem ser envelhecidas no RTFO e PAV. No entanto, neste estudo, os testes foram realizados com amostras envelhecidas naturalmente ao longo do tempo devido aos efeitos ambientais e de tráfego durante a vida útil do pavimento.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados das investigações físicas, químicas e reológicas dos ligantes asfálticos modificados com óleo de babaçu em condições não envelhecidas, envelhecidas a curto prazo e envelhecidas a longo prazo (Análise I – Cenário I). Além disso, avalia-se o potencial rejuvenescedor do óleo de babaçu em amostras de ligante asfáltico envelhecido a longo prazo por meio de protocolo laboratorial (Análise I – Cenário II) e em amostras de ligantes asfálticos recuperados de diferentes RAPs (Análise II).

3.3.1. ANÁLISE I

3.3.1.1. CENÁRIO I

Os ligantes asfálticos modificados com óleo de babaçu foram submetidos a uma análise física e reológica para investigar o impacto do óleo em sua capacidade de amolecimento. As amostras foram caracterizadas antes e após o envelhecimento acelerado pelo método RTFO, com a avaliação das propriedades físicas e reológicas. Os resultados físicos das amostras antes e depois do procedimento RTFO estão disponíveis na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados físicos do ligante asfáltico com óleo de babaçu antes e após o RTFO.

Antes RTFO										
Ensaio	(°C)	PEN 50/70	PEN 50/70 + 1%BO	PEN 50/70 + 2%BO	PEN 50/70 + 3%BO	PEN 50/70 + 4%BO	PEN 50/70 + 5%BO	PEN 50/70 + 7%BO	PEN 50/70 + 10%BO	PEN 50/70 + 12%BO
Penetração 0,1 mm	25°C	57,60	71,00	85,60	88,00	121,20	145,80	249,00	322,80	Maior que 350
Ponto de amolecimento (°C)	NA	51,75	49,00	45,50	42,50	41,00	37,50	31,50	30,50	26,50
Viscosidade Rotacional (cP)	135°C	401,00	380,57	338,30	316,68	277,99	252,62	200,97	172,10	136,00
	142°C	284,00	269,85	242,18	229,16	202,25	185,61	148,54	129,34	103,86
	150°C	198,00	189,36	171,46	162,34	144,94	133,32	107,84	95,83	77,06
	165°C	120,00	104,39	96,65	91,86	82,83	77,02	64,20	57,79	47,52
	177°C	73,00	69,38	64,28	61,66	55,87	52,46	44,52	40,45	33,23
Temperatura de mistura (°C)	NA	153,00	153,00	152,00	149,00	147,00	145,00	140,00	136,00	131,00
Temperatura de compactação (°C)	NA	144,00	143,00	140,00	139,00	137,00	136,00	130,00	125,00	123,00
Após RTFO										
Ensaio	(°C)	PEN 50/70 - RTFO	PEN 50/70 + 1%BO - RTFO	PEN 50/70 + 2%BO - RTFO	PEN 50/70 + 3%BO - RTFO	PEN 50/70 + 4%BO - RTFO	PEN 50/70 + 5%BO - RTFO	PEN 50/70 + 7%BO - RTFO	PEN 50/70 + 10%BO - RTFO	PEN 50/70 + 12%BO - RTFO
Penetração 0,1 mm	25°C	38,80	53,00	58,20	84,00	89,20	112,00	223,80	301,00	Maior que 350
Ponto de amolecimento (°C)	NA	56,50	53,00	49,25	47,50	44,50	41,75	36,50	31,00	27,00
Viscosidade Rotacional (cP)	135°C	548,00	505,49	447,77	406,93	353,77	327,49	253,95	211,87	167,28
	142°C	391,00	354,92	315,76	290,99	253,77	237,38	186,43	155,48	125,20
	150°C	269,00	243,62	219,60	203,73	179,07	168,10	134,32	113,66	92,93
	165°C	144,00	132,27	120,07	112,07	100,77	94,72	78,33	67,44	55,55
	177°C	94,00	85,46	78,26	73,94	66,68	63,11	52,96	46,47	39,25
Variação de massa RTFO (%)	Temperatura de mistura obtida para cada amostra de ligante asfáltico (+10°C)	0,37	0,37	0,07	0,00	0,29	0,39	0,22	0,14	0,09

Nota: BO: óleo de babaçu, RTFO: *rolling thin-film oven*.

Observa-se aumento na penetração do ligante à medida que se aumenta o teor de óleo de babaçu adicionado. Para a amostra com 12% de óleo de babaçu (BO), a medição precisa da

penetração não foi possível devido às limitações físicas do recipiente de ensaio, diâmetro interno de 55 mm e altura interna de 35 mm, impedindo uma leitura exata. Na Tabela 6 constatou-se que a penetração antes e após o ensaio RTFO para esta amostra excedeu 350 décimos de milímetro. Em relação aos teores examinados, houve aumento nas amostras antes do ensaio RTFO, variando de 23,27% a mais de 507,64% com 1% e 12%, respectivamente. Após o ensaio RTFO, esses aumentos variaram de 36,60% a mais de 507,64% para 1% e 12%, respectivamente. Essa tendência foi confirmada por estudos anteriores (da Costa *et al.*, 2024; de Medeiros Melo Neto *et al.*, 2023c; Mendonça *et al.*, 2022b; Neto *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2022) que investigaram o uso de outros tipos de óleos vegetais no ligante asfáltico.

Silva *et al.* (2022) investigaram o emprego de óleo de linhaça no ligante asfáltico com classificação de penetração 50/70, em teores variando de 1% a 6%. Eles observaram um aumento na penetração antes do ensaio RTFO, variando de 27,69% a 98,46%, e após o RTFO, de 13,04% a 73,91% para amostras contendo 1% e 5%, respectivamente. Em seu estudo, a variação na penetração com o uso de óleo de babaçu antes do ensaio RTFO foi de 23,27% a 153,13%, e após o RTFO, de 36,60% a 188,66% para amostras contendo 1% e 5%, respectivamente. Observa-se que o aumento obtido com o uso de óleo de babaçu supera aquele obtido com o óleo de linhaça, indicando um poder amolecedor maior para o óleo de babaçu.

Neto *et al.* (2022) realizaram uma avaliação comparativa do uso de óleo de algodão refinado e óleo de copaíba em teores de 4% e 5% como aditivos, individualmente, em um ligante asfáltico classificado com penetração 50/70. Os resultados demonstraram um aumento na penetração antes do ensaio RTFO em comparação com o ligante puro, sendo de 133,96% e 35,90% com o uso de 4% de óleo de algodão refinado e óleo de copaíba, respectivamente. Ao incorporar 5% desses óleos, o aumento foi de 187,38% e 96,57% para as amostras com óleo de algodão refinado e copaíba, respectivamente. No estudo, o aumento na penetração antes do ensaio RTFO com o uso de 4% e 5% de óleo de babaçu foi de 110,42% e 153,13%, respectivamente. Assim, observa-se que a eficácia do óleo de babaçu é superior à do óleo de copaíba e ligeiramente inferior à do óleo de algodão refinado.

Costa *et al.* (2024) também investigaram o uso do óleo de algodão em concentrações de 2% a 12% em um ligante asfáltico classificado como 50/70. No entanto, o óleo de algodão utilizado foi bruto e não refinado. O aumento na penetração antes do ensaio RTFO para as

amostras com 2% e 12% foi de 3,16% e 442,89%, respectivamente. Em contrapartida, o óleo de babaçu resultou em um aumento de 48,61% e mais de 507,64% para as concentrações de 2% e 12%, respectivamente. Esses resultados evidenciam a maior eficácia do óleo de babaçu em comparação com o óleo de algodão bruto na redução da consistência do ligante asfáltico PEN 50/70.

Guerra *et al.* (2023) introduziram óleo de canola no ligante asfáltico PEN 50/70, resultando em aumentos na penetração de 26,23%, 36,06% e 86,89% para concentrações de 1%, 2% e 3%, respectivamente. Por sua vez, o óleo de babaçu proporcionou aumentos na penetração de 23,26%, 48,61% e 52,78% para os mesmos teores testados. Assim, observa-se que o óleo de canola apresentou aumentos ligeiramente superiores na penetração em comparação com o óleo de babaçu.

A redução da consistência do ligante PEN 50/70 foi corroborada pelos dados obtidos do ponto de amolecimento, onde se observou que o aumento do teor de óleo de babaçu resultou em temperaturas de ponto de amolecimento mais baixas. Destacam-se as amostras com 7%, 10% e 12%, as quais apresentaram temperaturas ambientes típicas de regiões do Nordeste brasileiro, como 31,5°C, 30,5°C e 26,5°C, respectivamente. Isso sugere uma maior sensibilidade dessas amostras a temperaturas elevadas, indicando que não seriam capazes de manter um desempenho satisfatório em temperaturas acima dessas. Portanto, pode-se inferir que esses teores mais elevados podem ser viáveis para ligantes muito rígidos, como os encontrados no RAP.

Costa *et al.* (2024) observaram valores de ponto de amolecimento semelhantes ao adicionar 10% e 12% de óleo de algodão bruto, registrando 33,30°C e 29,50°C, respectivamente. Esses resultados foram ligeiramente superiores aos obtidos com o óleo de babaçu, indicando uma maior eficácia de amolecimento deste último óleo vegetal. Todas as amostras analisadas neste estudo demonstraram um aumento no ponto de amolecimento após o ensaio RTFO, sendo inferior ao limite máximo estabelecido na norma ASTM D36 (2020) de 8°C. O óleo de babaçu contribuiu para uma redução na variação do ponto de amolecimento após o processo de envelhecimento, sugerindo uma melhoria na resistência aos processos oxidativos do envelhecimento.

Quanto à viscosidade rotacional, observou-se a mesma tendência de redução de rigidez à medida que se aumenta o teor de óleo de babaçu. Todas as amostras após serem submetidas

ao envelhecimento RTFO apresentaram aumento de viscosidade e rigidez devido ao processo de envelhecimento. Esse comportamento é esperado, corroborando com os dados de penetração e ponto de amolecimento após RTFO. Estudos (da Costa *et al.*, 2024; Guerra *et al.*, 2023; Neto *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2022) verificaram o mesmo comportamento observado nesse estudo, menor viscosidade com o aumento de óleo vegetal no ligante asfáltico. A redução da viscosidade influencia diretamente na obtenção das temperaturas de mistura e compactação dos ligantes asfálticos.

A temperatura de projeto do ligante asfáltico na produção de misturas asfálticas deve situar-se em torno de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s para ligantes testados no viscosímetro rotacional. Na Tabela 6, são apresentadas as temperaturas de mistura e compactação das amostras de ligante modificado por meio de interpolação. De acordo com o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (2018) as misturas asfálticas mornas são produzidas em temperaturas entre 100°C e 150°C, considerando apenas o resultado de viscosidade rotacional. Portanto, entre as amostras testadas, os ligantes com 7%, 10% e 12% podem viabilizar a produção de misturas asfálticas mornas. Isso ocorre porque a temperatura dos agregados é aproximadamente 10°C superior às temperaturas de mistura obtidas para o ligante asfáltico. Dessa forma, as misturas produzidas com essas amostras tendem a atingir temperaturas de 150°C, 146°C e 141°C, respectivamente.

De acordo com a norma ASTM D2872 (2019) a variação da massa do ligante asfáltico não deve exceder 0,5%. De acordo com a Tabela 6, todas as amostras de ligante asfáltico não ultrapassaram o limite máximo estabelecido pela norma. Ao incorporar ácido graxo da borra do óleo de soja nos teores de 1%, 3% e 5%, Melo Neto *et al.* (2023c) também observaram variações de massa do ligante abaixo do limite estabelecido na norma. No entanto, Melo Neto *et al.* (2023b) identificaram valores acima de 0,5% para os teores de 6% e 7%. Isso pode ser justificado pelo fato de que os autores conduziram o ensaio RTFO à temperatura de 163°C, típica para ligante asfáltico convencional não modificado. Neste estudo, os autores optaram por realizar o ensaio RTFO em temperaturas específicas obtidas para cada amostra no ensaio de viscosidade rotacional. Ao submeter um ligante asfáltico mais fluído, que requer temperaturas de trabalho mais baixas, a uma temperatura de 163°C não reflete sua aplicabilidade em campo, pois expõe o ligante a condições de envelhecimento mais severas.

A Tabela 7 apresenta os dados obtidos no reômetro de cisalhamento dinâmico. O teste de *Performance Grade* (PG) permitiu a determinação dos valores do Módulo de Cisalhamento Dinâmico (G*), do parâmetro G-R e do PG das amostras de ligante asfáltico com óleo de babaçu. A temperatura mínima do PG não foi avaliada, pois o Brasil é um país tropical e temperaturas negativas não são comuns nesta região.

Tabela 7 - Dados reológicos do ligante asfáltico modificado com óleo de babaçu antes e após o RTFO.

Antes RTFO										
Ensaio	(°C)	PEN 50/70	PEN 50/70 + 1%BO	PEN 50/70 + 2%BO	PEN 50/70 + 3%BO	PEN 50/70 + 4%BO	PEN 50/70 + 5%BO	PEN 50/70 + 7%BO	PEN 50/70 + 10%BO	PEN 50/70 + 12%BO
PG (°C)	NA	64	64	64	58	58	52	52	46	40
PG contínuo (°C)	NA	67	65,9	64,2	61,9	59,8	57,4	53,5	50,2	45,5
G-R (kPa)	40	0,80	0,81	0,50	0,34	0,16	0,09	0,03	0,01	0,00
Após RTFO										
Ensaio	(°C)	PEN 50/70 - RTFO	PEN 50/70 + 1%BO - RTFO	PEN 50/70 + 2%BO - RTFO	PEN 50/70 + 3%BO - RTFO	PEN 50/70 + 4%BO - RTFO	PEN 50/70 + 5%BO - RTFO	PEN 50/70 + 7%BO - RTFO	PEN 50/70 + 10%BO - RTFO	PEN 50/70 + 12%BO - RTFO
PG (°C)	NA	64	64	58	58	52	52	46	46	40
PG contínuo (°C)	NA	65	64,8	61,8	60,4	57,8	56,2	51,2	47,1	42,6
PG com base no clima e no tráfego	NA	PG 64 (S)-XX	PG 64 (S)-XX	PG 58 (S)-XX	PG 58 (S)-XX	PG 52 (S)-XX	PG 52 (S)-XX	PG 46 (S)-XX	PG 46 (S)-XX	PG 40 (S)-XX
G-R (kPa)	40	4,29	3,75	1,93	1,37	0,71	0,46	0,12	0,01	0,01
IE	40	1,60	1,91	1,68	1,68	1,71	1,9	1,74	1,45	1,37
	46	1,72	1,91	1,7	1,69	1,7	1,89	1,71	1,45	1,43
	52	1,75	1,9	1,68	1,66	1,66	1,88	1,69	1,45	NA
	58	1,72	1,87	1,65	1,63	1,63	1,84	NA	NA	NA
	64	1,74	1,86	1,64	1,59	NA	NA	NA	NA	NA
	70	1,72	1,84	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Jnr a 0,1 kPa	64	3,40	4,07	5,93	7,56	9,88	12,40	22,70	36,80	59,20
	58	NA	NA	2,48	3,29	4,52	5,44	NA	NA	NA
	52	NA	NA	NA	NA	NA	2,38	4,88	NA	NA
	46	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2,11	3,89	NA
Jnr a 3,2 kPa	40	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3,25
	64	3,83	4,43	6,36	7,97	10,6	13,40	23,60	39,00	63,40
	58	NA	NA	2,77	3,52	4,87	6,16	NA	NA	NA
	52	NA	NA	NA	NA	NA	2,58	5,27	NA	NA
Jnr, diff (%)	46	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2,27	4,16	NA
	40	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3,39
	64	12,68	8,87	7,25	5,47	7,26	7,41	4,21	6,01	7,02
	58	NA	NA	11,91	6,94	7,64	13,24	NA	NA	NA
Jnr, diff (%)	52	NA	NA	NA	NA	NA	8,43	7,94	NA	NA
	46	NA	NA	NA	NA	NA	NA	8,02	6,97	NA
	40	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	4,36

Nota: BO: óleo de babaçu, diff: diferencial, G-R: parâmetro *Glover-Rowe*, IE: índice de envelhecimento, Jnr: compliância não recuperável, NA: não aplicável, PG: *performance grade*, RTFO: *rolling thin-film oven*.

Conforme observado na Tabela 7 há uma redução na classificação PG (em incrementos de 6 graus) dos ligantes asfálticos à medida que o teor de óleo de babaçu incorporado aumenta. A incorporação de 1% de óleo de babaçu (BO) não resultou em redução

na classificação PG do ligante PEN 50/70, mantendo-o classificado com PG de 64°C. Entretanto, após o ensaio RTFO, as amostras de ligante asfáltico com 2% e 3% de BO reduziram a classificação para PG de 58°C, enquanto aquelas com 4% e 5% apresentaram PG de 52°C. As reduções mais significativas foram alcançadas com a adição de 7%, 10% e 12%, resultando em PG de 46°C, 46°C e 40°C, respectivamente. O PG contínuo representa a variação do desempenho em intervalos de 1°C. Todas as amostras, após a adição do óleo de babaçu, apresentaram uma redução gradual da temperatura à medida que o teor de óleo aumentou. No entanto, a redução para 1% de óleo de babaçu foi significativamente menor em comparação com as outras concentrações, como evidenciado pela classificação PG de 6 em 6 graus (64°C).

A adição de óleos vegetais ao ligante asfáltico segue essa tendência de redução da rigidez, porém, alguns óleos são mais eficazes que outros nesse processo. Os valores apresentados na Tabela 7 para as amostras com 1%, 3% e 5% estão em concordância com os resultados obtidos por Melo Neto *et al.* (2023c) ao adicionar ácido graxo da borra do óleo de soja. Costa *et al.* (2024) conseguiram reduzir o PG do ligante PEN 50/70 para 46°C com o uso de 10% e 12% de óleo de algodão bruto, enquanto com o óleo de babaçu alcançaram uma redução para 40°C com 12% de óleo. Essa diminuição do PG evidencia o potencial amolecedor do aditivo e sua viabilidade para uso em misturas asfálticas recicladas, especialmente em ligantes muito rígidos e quebradiços, que requerem aditivos oleosos para atenuar essa rigidez.

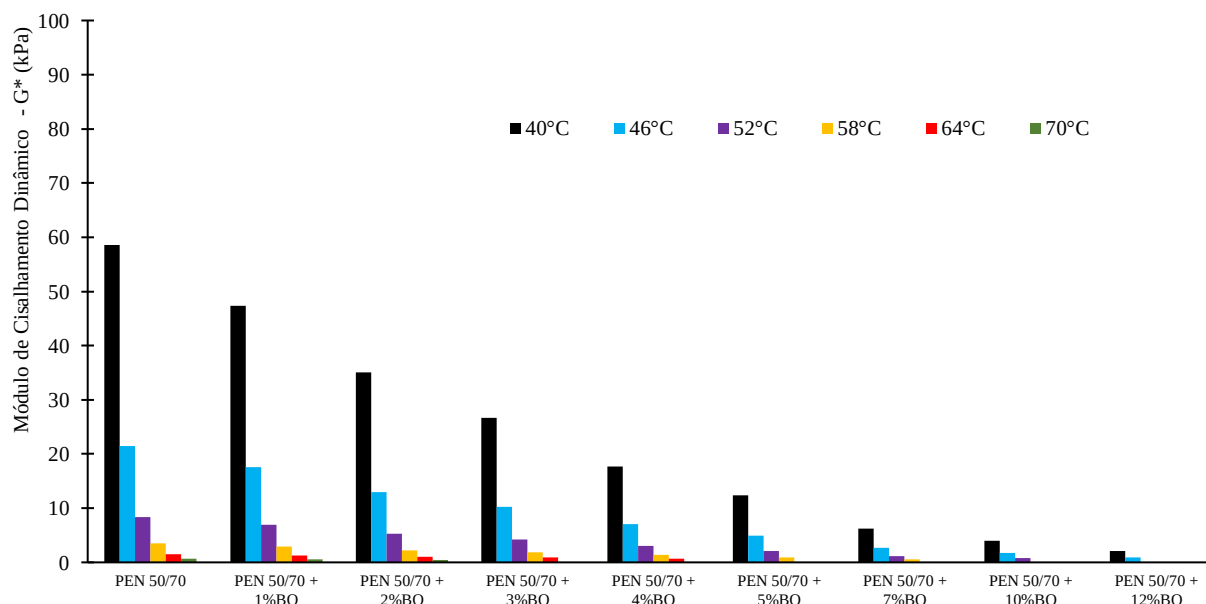
Outro parâmetro relevante para análise é o Índice de Envelhecimento (IE), que é calculado utilizando o parâmetro $G^*/\text{Sen}(\delta)$ obtido no ensaio de PG. Esse índice é determinado pela razão entre o valor de $G^*/\text{Sen}(\delta)$ após o ensaio RTFO e o valor de $G^*/\text{Sen}(\delta)$ antes do ensaio RTFO, para cada temperatura de aferição dos parâmetros. De acordo com Azahar *et al.* (2016), o índice de envelhecimento é importante porque mostra a suscetibilidade do material ao envelhecimento e descreve o desenvolvimento da rigidez do material em diferentes períodos da vida útil do pavimento.

A Tabela 7 indica que os ligantes asfálticos modificados apresentaram índices de envelhecimento (IE) semelhantes aos do PEN 50/70. As amostras com 10% e 12% demonstraram uma ligeira resistência ao envelhecimento, sugerindo maior durabilidade frente a esse processo. Esses ligantes, quando combinados ao ligante asfáltico envelhecido, podem

equilibrar suas propriedades reológicas, especialmente considerando sua alta rigidez e menor suscetibilidade a altas temperaturas. Isso sugere uma possível aplicabilidade desses aditivos em ligantes asfálticos recuperados de RAP. Melo Neto *et al.* (2023c) também observaram resultados semelhantes em sua pesquisa. No entanto, os valores encontrados com a borra do óleo de soja foram superiores aos obtidos com o ácido graxo da borra do óleo de soja, devido principalmente ao maior teor de umidade na borra (41,85%) em comparação com o ácido graxo (2,26%). Portanto, a estabilidade ao envelhecimento observada com o óleo de babaçu pode ser atribuída a componentes mais estáveis em sua composição e a um baixo teor de umidade (0,42%).

A Figura 11 apresenta os resultados do Módulo de Cisalhamento Dinâmico (G^*) das amostras de ligante modificado avaliadas antes e após o RTFO. A redução na rigidez é evidenciada pelos dados de G^* , onde um aumento no teor de óleo resulta em uma diminuição na rigidez, bem como um aumento na temperatura de ensaio. Este padrão foi observado em todas as amostras antes e após o teste RTFO.

(a)



(b)

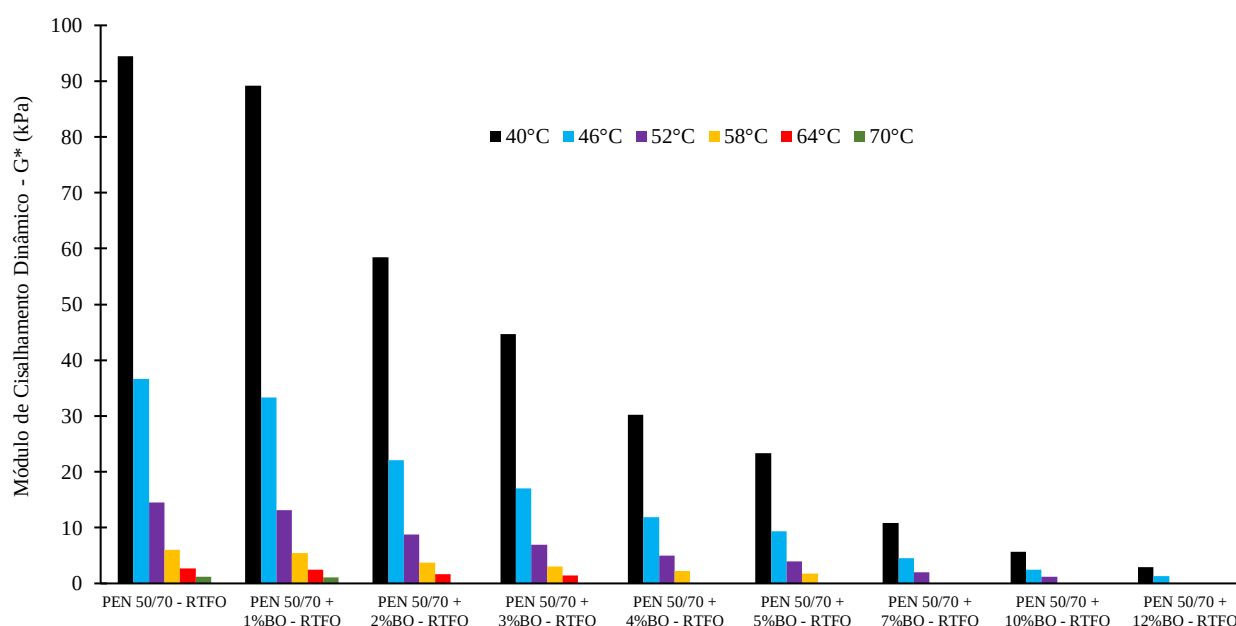


Figura 11 - Módulo de cisalhamento dinâmico (G^*) do ligante asfáltico modificado: (a) antes do RTFO, (b) após o RTFO.

O parâmetro G-R foi determinado a uma temperatura de 40°C para verificar a suscetibilidade dos ligantes asfálticos ao trincamento após a adição de óleo de babaçu. O processo de envelhecimento de curto prazo (RTFO) levou a um aumento nos valores do parâmetro G-R para todas as amostras ensaiadas, indicando que o envelhecimento contribui para um aumento na suscetibilidade ao trincamento. Observou-se também que os valores de G-R diminuíram à medida que o teor de óleo incorporado no ligante aumentou, tanto antes quanto após o RTFO (Tabela 7). Essa redução foi considerável para os teores mais altos de óleo, de 10% e 12%, alcançando um valor de 0,00 antes do RTFO e 0,01 após o RTFO. Ou seja, mesmo após o envelhecimento de curto prazo do ligante asfáltico, o óleo atuou como mitigador da suscetibilidade do ligante ao trincamento. No entanto, a adição de dosagens muito altas de óleo de babaçu pode fazer com que o ângulo de fase recupere o nível do ligante virgem, mas o ligante tende a ficar muito macio e perder suas propriedades físicas (Hu *et al.*, 2024; Zahoor *et al.*, 2021).

O ensaio MSCR permite investigar a suscetibilidade do ligante asfáltico à deformação permanente, destacando a perda ou ganho de rigidez após a adição de modificadores (Mendonça *et al.*, 2022b; Carvalho *et al.*, 2023). Os dados do ensaio MSCR na temperatura máxima de PG do ligante PEN 50/70 (64°C) estão apresentados na Tabela 7. Além disso, o

teste foi conduzido nas temperaturas máximas de PG obtidas para cada amostra específica de ligante após a adição de óleo de babaçu. O objetivo da análise do ligante asfáltico modificado com óleo de babaçu foi verificar seu potencial como agente rejuvenescedor para misturas asfálticas recicladas. Portanto, os elevados valores de Jnr a 3,2 kPa tendem a ser compensados no produto final do ligante asfáltico presente na mistura asfáltica reciclada. Isso ocorre porque o Jnr do ligante asfáltico do RAP geralmente possui valores significativamente menores devido aos processos oxidativos que o ligante sofreu ao longo de sua vida útil.

Na temperatura de 64°C, todas as amostras de ligante asfáltico com óleo de babaçu, exceto aquelas com 1%, apresentaram valores de Jnr a 3,2 kPa acima de 4,5, o limite máximo estipulado para a classificação em tráfego padrão “*Standard*” (S), conforme a norma AASHTO M320 (2021). No entanto, quando o ensaio foi conduzido na temperatura de PG específica de cada amostra de ligante, as classificações foram padrão (S). Portanto, os ligantes com menor rigidez (7%, 10% e 12%) podem ser aplicados em regiões que apresentam baixas temperaturas durante o verão. Caso contrário, temperaturas acima do PG de 46°C e 40°C comprometerão o desempenho do pavimento em relação à deformação permanente.

Os ligantes asfálticos foram classificados quanto ao PG com base no clima e tráfego para as temperaturas de ensaio em cada amostra, conforme apresentado na Tabela 7, onde o símbolo XX representa a temperatura baixa de PG do ligante não estudada nesta pesquisa. O Jnr, diff é o valor expresso como uma porcentagem da diferença entre o Jnr a 0,1 kPa e 3,2 kPa, sendo que a norma AASHTO M320 (2021) limita esse valor a 75%. Observa-se que todas as amostras apresentaram valores abaixo de 75%, indicando que os materiais são adequados para utilização nesta faixa de temperatura ensaiada.

Costa *et al.* (2024) também investigaram a suscetibilidade do ligante PEN 50/70 com óleo de algodão bruto nos teores de 2% a 12% e observaram que todas as amostras foram classificadas para tráfego padrão (S), mesmo na temperatura de 64°C. Em contraste, neste estudo, as amostras a partir de 2% com óleo de babaçu foram classificadas apenas para tráfego padrão (S) nas temperaturas (<64°C) específicas de PG de cada amostra. Neto *et al.* (2022) também obtiveram a classificação padrão (S) para amostras de ligante com 4% e 5% de óleo de algodão refinado e óleo de copaíba na temperatura de ensaio de 64°C. Mendonça *et al.* (2022b) também relataram classificação de tráfego padrão (S) para amostras de ligante com óleo de algodão refinado nos teores de 1% a 6%, ensaiadas na temperatura de 64°C.

Assim, o óleo de babaçu demonstrou maior suscetibilidade e maior potencial amolecedor do que esses outros óleos vegetais estudados. Os resultados reológicos do ligante modificado com óleo de babaçu nos teores propostos após envelhecimento a longo prazo (LTA) estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados reológicos do ligante asfáltico com óleo de babaçu após o LTA.

Ensaio	(°C)	PEN 50/70 - LTA	PEN 50/70 + 1%BO - LTA	PEN 50/70 + 2%BO - LTA	PEN 50/70 + 3%BO - LTA	PEN 50/70 + 4%BO - LTA	PEN 50/70 + 5%BO - LTA	PEN 50/70 + 7%BO - LTA	PEN 50/70 + 10%BO - LTA	PEN 50/70 + 12%BO - LTA
Varição de massa após LTA	Temperatura de mistura obtida para cada amostra de ligante asfáltico (+10°C)	1,93	1,89	1,11	0,42	0,34	0,38	0,24	0,26	0,16
PG (°C)	NA	70,00	70,00	64,00	64,00	58,00	58,00	52,00	52,00	46,00
PG contínuo (°C)	NA	72,40	71,00	67,80	64,50	61,60	60,40	56,80	53,50	49,50
PG com base no clima e no tráfego	NA	PG 70 (S)-XX	PG 70 (S)-XX	PG 64 (S)-XX	PG 64 (S)-XX	PG 64 (S)-XX	PG 58 (S)-XX	PG 58 (S)-XX	PG 46 (S)-XX	PG 46 (S)-XX
G-R (kPa)	40	30,64	20,43	11,80	4,25	2,21	1,75	0,75	0,39	0,17
IE	40	4,71	4,30	3,90	2,70	2,87	3,43	3,55	3,44	3,80
	46	4,77	4,45	4,04	2,83	2,85	3,37	3,58	3,41	3,65
	52	4,81	4,47	3,97	2,83	2,76	3,29	3,53	3,30	NA
	58	4,70	4,39	3,85	2,76	2,67	3,17	3,40	NA	NA
	64	4,58	4,28	3,75	2,67	2,58	NA	NA	NA	NA
	70	4,40	4,16	3,55	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Jnr a 0,1 kPa	70	3,15	4,42	6,47	6,82	8,06	11,40	17,20	39,30	57,00
	64	NA	NA	2,37	3,06	3,71	NA	NA	NA	NA
	58	NA	NA	NA	NA	NA	2,06	4,02	NA	NA
	52	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	4,62	NA
	46	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1,44	3,31
Jnr a 3,2 kPa	70	3,39	4,81	6,98	7,38	9,18	12,70	19,50	43,20	63,20
	64	NA	NA	2,66	3,36	4,20	NA	NA	NA	NA
	58	NA	NA	NA	NA	NA	2,51	4,33	NA	NA
	52	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5,12	NA
	46	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2,01	3,68
Jnr, diff (%)	70	7,70	8,72	7,95	8,34	13,88	10,65	13,30	9,76	10,76
	64	NA	NA	12,30	9,84	13,31	NA	NA	NA	NA
	58	NA	NA	NA	NA	NA	22,03	7,64	NA	NA
	52	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	10,89	NA
	46	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	39,76	11,17

Nota: BO: óleo de babaçu, diff: diferencial, G-R: parâmetro *Glover-Rowe*, IE: índice de envelhecimento, Jnr: compliância não recuperável, LTA: *long-term aging*, NA: não aplicável, PG: *performance grade*.

Os ligantes asfálticos presentes nas misturas asfálticas estão sujeitos a processos físicos e químicos degradativos devido à temperatura e ao tráfego ao longo de sua vida útil. Portanto, é essencial que esses materiais possuam durabilidade e resistência adequadas para manter o desempenho da camada de revestimento asfáltico. Conforme observado na Tabela 8, as variações de massa após o processo de envelhecimento a longo prazo (LTA) para as amostras PEN 50/70, PEN 50/70 + 1% BO - LTA e PEN 50/70 + 2% BO - LTA excederam o limite máximo estabelecido para o envelhecimento RTFO (0,5%). No entanto, as demais amostras apresentaram uma variação de massa menor que o ligante puro e abaixo de 0,5%. Isso pode ser atribuído às temperaturas de envelhecimento, que, para as misturas mais fluidas (menos viscosas devido aos maiores teores de óleo), foram menores do que para o ligante puro. Em outras palavras, a perda da fração mais volátil ocorreu devido às altas temperaturas de trabalho, geralmente acima de 160°C. A perda de massa após o procedimento LTA foi maior em comparação ao RTFO para todas as amostras testadas, devido ao maior tempo de exposição ao envelhecimento.

Quanto à classificação PG, todas as amostras ensaiadas apresentaram um aumento de um degrau (6°C) na classificação convencional PG dos pós-RTFO para pós-LTA. Isso indica um aumento na rigidez das amostras e confirma a eficácia da metodologia de envelhecimento a longo prazo realizada por meio da estufa do RTFO. Além disso, foi observado um aumento nos valores de PG contínuo em todas as amostras após o LTA. Esses resultados estão alinhados com os achados de Subbarao Nagabhushanarao e Vijayakumar (2021) ao analisar os efeitos do envelhecimento LTA pela estufa RTFO em ligantes asfálticos denominados PG 70-XX e PG 64-XX.

A Figura 12 apresenta os dados relativos ao Módulo de Cisalhamento Dinâmico (G^*) das amostras de ligante modificado após o envelhecimento a longo prazo. Após o processo de LTA, observou-se um aumento na rigidez, conforme evidenciado pelos dados de G^* , com valores mais altos para todas as amostras em comparação com os dados pós-RTFO apresentados na Figura 11 (b). Após o processo LTA, foi observado um aumento na rigidez, como evidenciado pelos dados de G^* , com valores mais altos para todas as amostras em comparação com os dados pós-RTFO apresentados na Tabela 8.

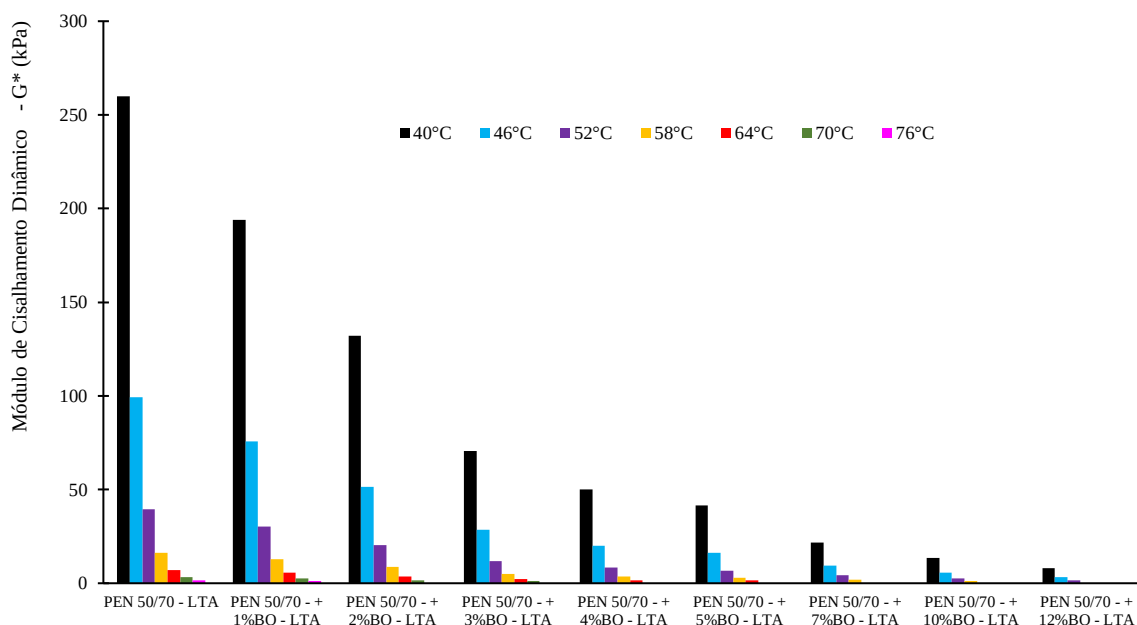


Figura 12 - Módulo de cisalhamento dinâmico (G^*) do ligante asfáltico modificado após o LTA.

O Índice de Envelhecimento (IE) foi determinado pela razão entre o valor de $G^*/\text{Sen}(\delta)$ após o ensaio LTA e o valor de $G^*/\text{Sen}(\delta)$ antes do ensaio RTFO (não envelhecido), para cada temperatura de aferição dos parâmetros. Os valores obtidos e apresentados na Tabela 8 indicam uma semelhança no grau de envelhecimento para todas as amostras testadas. No entanto, as amostras modificadas demonstraram índices de envelhecimento ligeiramente inferiores ao do ligante PEN 50/70, possivelmente devido à estabilidade dos componentes presentes no óleo e às menores temperaturas de ensaio.

Lopes *et al.* (2023) conduziram um experimento de envelhecimento de amostras de ligante asfáltico PEN 50/70 em estufa convencional após o ensaio RTFO, simulando o envelhecimento a longo prazo. As amostras foram expostas a uma temperatura de 85°C por 5 dias. Os resultados mostraram um valor de PG de 70°C e um índice de envelhecimento de 3,74, 3,71, 3,57 e 3,48 para as temperaturas de 46°C, 52°C, 58°C e 64°C, respectivamente. Esses valores são consistentes com os obtidos neste estudo para o ligante PEN 50/70. No entanto, após o processo de LTA pelo RTFO, os valores de IE para o ligante nessas temperaturas (Tabela 8) foram maiores, indicando um maior grau de envelhecimento pela metodologia utilizada neste estudo.

Ao analisar o parâmetro G-R (Tabela 8) observou-se um aumento considerável de 26,35 kPa (614,22%) na amostra de ligante asfáltico não modificado do estado após RTFO para após LTA. Isso demonstra como o envelhecimento contribui para a suscetibilidade do ligante asfáltico ao trincamento. Esse comportamento está alinhado com o estudo de Hu *et al.* (2024), que realizaram envelhecimento de longo prazo (PAV) em um ligante asfáltico com grau de penetração de 70/100 e observaram um aumento no parâmetro G-R de 12,2 kPa para 193 kPa. As amostras de ligante asfáltico modificadas com óleo de babaçu mostraram um aumento nos valores de G-R, mas mantiveram a tendência observada anteriormente: uma diminuição no G-R à medida que a quantidade de óleo adicionado aumentava.

Mesmo após o procedimento LTA, observa-se que as amostras com teores de óleo de babaçu (BO) a partir de 2% mostraram-se altamente suscetíveis à deformação permanente à temperatura base do ligante PEN 50/70 (70°C), com valores excessivos de Jnr a 3,2 kPa para as amostras com 5%, 7%, 10% e 12%. No entanto, quando ensaiadas nas temperaturas de PG referentes a cada amostra, todas se enquadraram para o tráfego padrão (S) com valores de Jnr a 3,2 kPa acima de 2,0 e abaixo de 4,5, conforme a AASHTO M320 (2021). Mesmo após o processo LTA, as amostras com 10% e 12% de BO mostraram-se suscetíveis ao sulco em temperaturas iguais ou superiores a 52°C, destacando o poder amolecedor do BO. Todas as amostras apresentaram valores de Jnr, diff inferiores ao limite máximo de 75%, indicando a viabilidade de aplicação dos ligantes na temperatura de teste do ensaio.

Conforme ilustrado na Figura 13, todas as amostras de ligante asfáltico modificadas com óleo de babaçu (1% a 12%) apresentaram uma tendência de redução do PG e da rigidez à medida que o teor de óleo aumentou. Esse comportamento foi observado nas três condições analisadas: não envelhecidas (antes do RTFO), envelhecidas a curto prazo (após o RTFO) e envelhecidas a longo prazo (LTA). A relação linear entre o teor de óleo e a redução da rigidez foi evidenciada pelo coeficiente de determinação (R^2) próximo a 1.

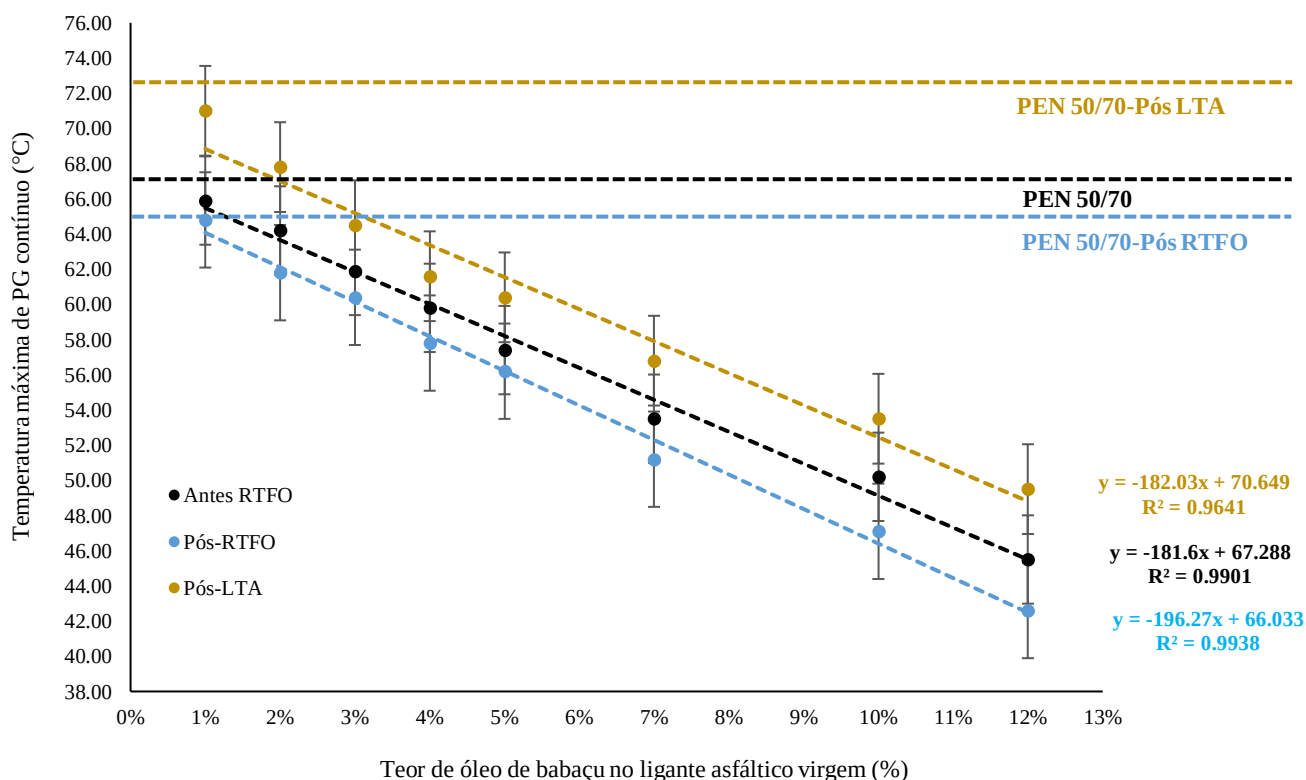


Figura 13 - Variação dos valores de PG contínuo em função do teor de óleo de babaçu e da condição de envelhecimento.

3.3.1.1.1. ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO REOLÓGICO E CUSTOS DO ÓLEO DE BABAÇU COM OUTROS ÓLEOS VEGETAIS EM LIGANTE ASFÁLTICO

Um estudo reológico comparativo foi conduzido utilizando dados de PG e Jnr a 3,2 kPa para viabilizar e demonstrar a aplicabilidade do óleo de babaçu como modificador para o ligante asfáltico PEN 50/70. Esta pesquisa comparou os efeitos do óleo de babaçu sobre a rigidez e a suscetibilidade à deformação permanente com outros óleos vegetais já documentados na literatura. Os dados de PG contínuo não foram apresentados porque alguns estudos não forneceram esses dados para os ligantes modificados. Por fim, foi realizada uma comparação de custos, onde os custos unitários de cada óleo vegetal foram determinados pela média dos custos de três fornecedores diferentes. A Tabela 9 apresenta os dados reológicos para o ligante asfáltico PEN 50/70 modificado com diversos óleos vegetais nas concentrações de 1%, 2%, 3%, 4% e 5%.

Tabela 9 - Dados reológicos e custos do ligante asfáltico PEN 50/70 com óleos vegetais.

Amostras	PG	PG - Após RTFO	Jnr a 3,2 kPa	PG baseado no clima e tráfego	Estudo	Custos R\$/kg
PEN 50/70	64	64	3,83	PG 64 (S)-XX	NA	3,85
99% PEN 50/70 e 1% de óleo vegetal						
PEN 50/70 + 1%BO	64	64	4,43	PG 64 (S)-XX	NA	3,85
PEN 50/70 + 1%SO	64	64	2,15	PG 64 (S)-XX	(Silva, 2016)	4,11
PEN 50/70 + 1%MO	64	64	2,03	PG 64 (S)-XX	(Silva, 2016)	5,22
PEN 50/70 + 1%CPO	64	64	2,10	PG 64 (S)-XX	(Silva <i>et al.</i> , 2024)	4,97
PEN 50/70 + 1%CO	58	58	2,30	PG 58 (S)-XX	(Mendonça <i>et al.</i> , 2022a)	4,04
PEN 50/70 + 1%LO	64	64	3,20	PG 64 (S)-XX	(Silva <i>et al.</i> , 2022)	4,27
PEN 50/70 + 1%COR	64	64	3,63	PG 64 (S)-XX	(Portugal <i>et al.</i> , 2017)	4,05
PEN 50/70 + 1%SOY	64	64	3,52	PG 64 (S)-XX	(Portugal <i>et al.</i> , 2018b)	3,98
98% PEN 50/70 e 2% de óleo vegetal						
PEN 50/70 + 2%BO	64	58	2,77	PG 58 (S)-XX	NA	4,32
PEN 50/70 + 2%SO	64	58	2,29	PG 58 (S)-XX	(Silva, 2016)	4,36
PEN 50/70 + 2%MO	58	58	2,65	PG 58 (S)-XX	(Silva, 2016)	6,58
PEN 50/70 + 2%CPO	64	64	4,00	PG 64 (S)-XX	(Silva <i>et al.</i> , 2024)	6,10
PEN 50/70 + 2%CO	58	58	2,80	PG 58 (S)-XX	(Mendonça <i>et al.</i> , 2022a)	4,23
PEN 50/70 + 2%LO	58	58	3,50	PG 58 (S)-XX	(Silva <i>et al.</i> , 2022)	4,69
PEN 50/70 + 2%COR	64	64	4,05	PG 64 (S)-XX	(Portugal <i>et al.</i> , 2017)	4,24
PEN 50/70 + 2%SOY	64	64	4,13	PG 64 (S)-XX	(Portugal <i>et al.</i> , 2018b)	4,11
97% PEN 50/70 e 3% de óleo vegetal						
PEN 50/70 + 3%BO	58	58	3,52	PG 58 (S)-XX	NA	4,56
PEN 50/70 + 3%CPO	64	64	3,40	PG 64 (S)-XX	(Silva <i>et al.</i> , 2024)	7,22
PEN 50/70 + 3%CO	58	58	3,90	PG 58 (S)-XX	(Mendonça <i>et al.</i> , 2022a)	4,41
PEN 50/70 + 3%LO	58	58	3,80	PG 58 (S)-XX	(Silva <i>et al.</i> , 2022)	5,11
PEN 50/70 + 3%COR	64	58	3,41	PG 58 (S)-XX	(Portugal <i>et al.</i> , 2017)	4,44
PEN 50/70 + 3%SOY	58	58	2,88	PG 58 (S)-XX	(Portugal <i>et al.</i> , 2018b)	4,24
96% PEN 50/70 e 4% de óleo vegetal						
PEN 50/70 + 4%BO	58	52	2,02	PG 52 (S)-XX	NA	4,80
PEN 50/70 + 4%CPO	58	58	2,80	PG 58 (S)-XX	(Neto <i>et al.</i> , 2022)	8,34
PEN 50/70 + 4%CO	58	58	4,00	PG 58 (S)-XX	(Mendonça <i>et al.</i> , 2022a)	4,60
PEN 50/70 + 4%LO	58	58	3,90	PG 58 (S)-XX	(Silva <i>et al.</i> , 2022)	5,53
95% PEN 50/70 e 5% de óleo vegetal						
PEN 50/70 + 5%BO	52	52	2,58	PG 52 (S)-XX	NA	5,04
PEN 50/70 + 5%CPO	58	58	3,80	PG 58 (S)-XX	(Neto <i>et al.</i> , 2022)	9,47
PEN 50/70 + 5%CO	52	52	4,00	PG 52 (S)-XX	(Mendonça <i>et al.</i> , 2022a)	4,79
PEN 50/70 + 5%LO	52	52	2,30	PG 52 (S)-XX	(Silva <i>et al.</i> , 2022)	5,95
Materials				R\$/kg		
PEN 50/70				3,85		
Óleo de babaçu (BO)				27,59		
Óleo de girassol (SO)				29,50		
Óleo de moringa (MO)				140,50		
Óleo de copaíba (CPO)				116,16		
Óleo de algodão (CO)				22,65		
Óleo de linhaça (LO)				45,80		
Óleo de milho (COR)				23,58		
Óleo de soja (SOY)				17,00		

Nota: BO: óleo de babaçu, CO: óleo de algodão, COR: óleo de milho, CPO: óleo de copaíba, Jnr: compliância não recuperável, LO: óleo de linhaça, MO: óleo de moringa, NA: não aplicável, PG: *performance grade*, R\$: real, RTFO: *rolling thin-film oven*, (S): padrão, SO: óleo de girassol, SOY: óleo de soja.

Ao observar a Tabela 9, nota-se que, para um teor de 1%, todos os óleos vegetais apresentaram a mesma classificação PG de 64°C, exceto a amostra com óleo de algodão, que já demonstrou efeitos de amolecimento. Ao incorporar 2%, observa-se que os óleos de babaçu, girassol, moringa, algodão e linhaça resultaram em uma redução na classificação PG

de 64°C para 58°C após o RTFO, uma condição representativa da aplicação em campo da mistura asfáltica. Isso demonstra que esses óleos, a partir de 2%, já exibem efeitos de amolecimento e podem ser usados no gráfico de mistura para definir os teores de RAP. Os óleos vegetais mantiveram a classificação PG para incorporações de 2% e 3%. Ao adicionar 4% de óleo vegetal, o único óleo que resultou em uma redução na classificação PG foi o óleo de babaçu, para 52°C, demonstrando maior eficácia no amolecimento do ligante a este teor de adição. Finalmente, ao adicionar 5%, observou-se que o único óleo a esse teor que não resultou em uma redução na classificação PG foi o óleo de copaíba. Assim, pode-se afirmar que o óleo de babaçu se igualou a outros óleos vegetais com maiores potenciais de amolecimento—girassol, algodão e linhaça—destacando-se por sua maior eficácia ao comparar seu uso a 4%, sendo o único a reduzir a classificação PG do ligante.

Os valores de Jnr a 3,2 kPa foram obtidos na temperatura máxima PG para cada amostra, onde todos os ligantes asfálticos analisados mostraram a mesma classificação baseada nas condições climáticas e de tráfego, em relação ao nível de tráfego padrão (S), limitado à temperatura PG obtida para cada amostra. Ligantes com maior potencial de amolecimento exibiram classificação PG mais baixa. Portanto, os óleos vegetais demonstraram efeitos semelhantes no ligante PEN 50/70, indicando a importância de uma variedade de óleos que podem ser aplicados ao ligante, evitando assim a dependência específica de um único óleo, dispersando o uso de diferentes tipos e garantindo viabilidade nas regiões onde cada um é produzido, reduzindo os custos excessivos de transporte. Os óleos vegetais que se destacaram em termos de redução de rigidez do ligante foram babaçu, algodão, girassol, moringa e linhaça.

Para comparar os custos de produção de ligantes asfálticos modificados com óleos vegetais, foi realizada uma análise considerando apenas os custos de produção, excluindo o transporte. Isso se baseia na premissa de que a viabilidade de uso de cada óleo é determinada pelas regiões onde são produzidos, reduzindo assim o consumo de combustíveis fósseis e as emissões de gases de efeito estufa. Conforme observado na Tabela 9, os óleos de babaçu, girassol, milho, algodão e soja mostraram custos unitários semelhantes, resultando em custos comparáveis para os ligantes modificados. Por outro lado, os óleos de moringa e copaíba demonstraram custos consideravelmente mais altos. Também foi observado que, à medida que a porcentagem de óleo vegetal adicionado ao ligante aumenta, os custos também aumentam, pois os óleos vegetais são mais caros do que o ligante virgem (PEN 50/70). No entanto, é

crucial determinar o ponto em que a adição de óleo ao ligante asfáltico em grande escala se torna economicamente viável, considerando os custos de transporte para a usina asfáltica. Além disso, devido às suas propriedades de amolecimento, esses óleos são recomendados para incorporação em ligantes envelhecidos, como aqueles encontrados no RAP. Portanto, ao usar esses óleos como modificadores de ligante asfáltico em misturas com teores de RAP superiores a 30%, a viabilidade aumenta, pois tende a reduzir o consumo de ligante asfáltico e também o uso de agregados virgens.

3.3.1.2. CENÁRIO II

Para avaliar os efeitos da adição de óleo de babaçu e do ligante modificado pelo óleo no ligante envelhecido após LTA, foram conduzidos ensaios reológicos nas amostras, conforme descrito na Tabela 10. Os dados apresentados na Tabela 10 indicam uma redução do PG em todos os teores testados, tanto pela adição de óleo de babaçu quanto pela incorporação do ligante asfáltico modificado com óleo de babaçu ao ligante envelhecido LTA. Este resultado confirma o efeito amolecedor em amostras envelhecidas a longo prazo (LTA). Destaca-se que o teor de 1% não foi considerado nos testes, pois não resultou em redução do PG do ligante PEN 50/70.

Este estudo revelou que a adição do ligante modificado pelo óleo de babaçu resultou em uma maior redução do PG do ligante PEN 50/70 - LTA em comparação com a adição direta do óleo ao ligante envelhecido. Em um estudo anterior, Costa *et al.* (2023a) investigaram a influência do momento de adição do agente rejuvenescedor, seja diretamente no RAP ou misturado ao ligante asfáltico, usando óleo de motor residual na produção de misturas asfálticas recicladas com altos teores de RAP (>30%). Embora não tenham sido observadas variações estatisticamente significativas no desempenho das misturas produzidas pelos dois métodos, os resultados indicaram que as misturas produzidas com o ligante asfáltico modificado pelo óleo de motor residual apresentaram desempenho ligeiramente superior. Assim, esses achados são consistentes com os dados obtidos neste estudo, demonstrando a maior eficácia do ligante asfáltico modificado pelo óleo de babaçu em comparação com a adição apenas do óleo.

Tabela 10 - Dados reológicos de ligantes envelhecidos após o LTA com adição do óleo de babaçu.

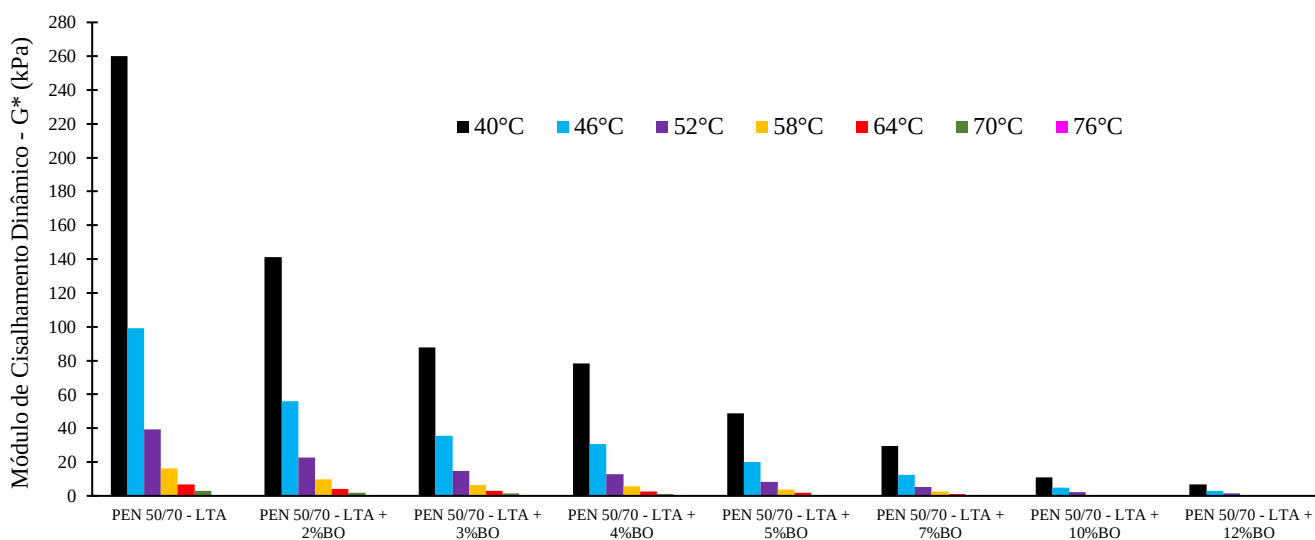
PEN 50/70 – LTA + adição direta do óleo de babaçu									
Ensaio	(°C)	PEN 50/70 - LTA	PEN 50/70 - LTA + 2%BO	PEN 50/70 - LTA + 3%BO	PEN 50/70 - LTA + 4%BO	PEN 50/70 - LTA + 5%BO	PEN 50/70 - LTA + 7%BO	PEN 50/70 - LTA + 10%BO	PEN 50/70 - LTA + 12%BO
PG (°C)	NA	70,0	64,0	64,0	64,0	58	58,0	46,0	46,0
PG contínuo (°C)	NA	72,4	68,7	66,4	64,9	61,8	59,0	51,7	48,4
PG baseado no clima e tráfego	NA	PG 70(S) - XX	PG 64(S) - XX	PG 64(S) - XX	PG 64(S) - XX	PG 58(S) - XX	PG 58 (S)- XX	PG 46(S) - XX	PG 46(S) - XX
G-R (kPa)	40	30,64	13,83	7,30	5,43	2,86	1,15	0,27	0,13
Jnr a 0,1 kPa	70	3,15	4,83	6,82	8,06	11,40	17,20	39,30	57,00
	64	NA	1,91	3,06	3,71	NA	NA	NA	NA
	58	NA	NA	NA	NA	2,06	4,02	NA	NA
	52	NA	NA	NA	NA	NA	NA	4,62	NA
	46	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1,44	3,31
Jnr a 3,2 kPa	70	3,39	5,57	7,38	9,18	12,70	19,50	43,20	63,20
	64	NA	2,46	3,36	4,2	NA	NA	NA	NA
	58	NA	NA	NA	NA	2,51	4,33	NA	NA
	52	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5,12	NA
	46	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2,01	3,68
Jnr, diff (%)	70	7,70	15,36	8,34	13,88	10,65	13,3	9,76	10,76
	64	NA	28,8	9,84	13,31	NA	NA	NA	NA
	58	NA	NA	NA	NA	22,03	7,64	NA	NA
	52	NA	NA	NA	NA	NA	NA	10,89	NA
	46	NA	NA	NA	NA	NA	NA	39,76	11,17
PEN 50/70 – LTA + adição do ligante modificado com óleo de babaçu									
Ensaio	(°C)	PEN 50/70 - LTA	PEN 50/70 - LTA + (PEN 50/70 + 2%BO)	PEN 50/70 - LTA + (PEN 50/70 + 3%BO)	PEN 50/70 - LTA + (PEN 50/70 + 4%BO)	PEN 50/70 - LTA + (PEN 50/70 + 5%BO)	PEN 50/70 - LTA + (PEN 50/70 + 7%BO)	PEN 50/70 - LTA + (PEN 50/70 + 10%BO)	PEN 50/70 - LTA + (PEN 50/70 + 12%BO)
PG (°C)	NA	70,0	58,0	58,0	58,0	52,0	52,0	52,0	46,0
PG contínuo (°C)	NA	72,4	59,8	59,8	59,6	57,3	57,6	54,3	49,5
PG baseado no clima e tráfego	NA	PG 70(S) - XX	PG 58(S) - XX	PG 58(S) - XX	PG 58(S) - XX	PG 58(S) - XX	PG 52(S) - XX	PG 52(S) - XX	PG 52(S) - XX
G-R (kPa)	40	30,64	1,10	1,02	1,06	1,01	0,65	0,68	0,33
Jnr a 0,1 kPa	70	3,15	17,10	15,80	16,80	18,40	20,00	18,10	30,90
	64	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	58	NA	2,97	3,44	3,63	3,78	NA	NA	NA
	52	NA	NA	NA	NA	NA	1,89	2,2	3,27
	46	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Jnr a 3,2 kPa	70	3,39	17,80	17,60	17,40	19,80	21,60	20,70	33,40
	64	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	58	NA	3,29	3,66	3,94	4,17	NA	NA	NA
	52	NA	NA	NA	NA	NA	2,11	2,45	3,58
	46	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Jnr, diff (%)	70	7,70	3,71	11,46	3,27	7,47	8,14	14,19	8,14
	64	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	58	NA	10,65	6,53	8,68	10,23	NA	NA	NA
	52	NA	NA	NA	NA	NA	11,17	11,27	9,70
	46	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Nota: BO: óleo de babaçu, diff: diferencial, G-R: parâmetro *Glover-Rowe*, Jnr: compliância não recuperável, LTA: *long-term aging*, NA: não aplicável, PG: *performance grade*.

A Figura 14 apresenta os parâmetros Módulo de Cisalhamento Dinâmico (G^*) das amostras de ligante envelhecidas a longo prazo após a adição de óleo de babaçu em ambos os tipos de análise. A redução na rigidez também é evidente nos dados de módulo de cisalhamento dinâmico (G^*), onde as amostras do ligante PEN 50/70 - LTA com a adição de

óleo ou o ligante modificado por óleo, em todos os níveis testados, apresentaram menor rigidez em comparação com o ligante puro. À medida que a quantidade de óleo adicionado aumentou, a redução na rigidez do ligante envelhecido tornou-se mais pronunciada.

(a)



(b)

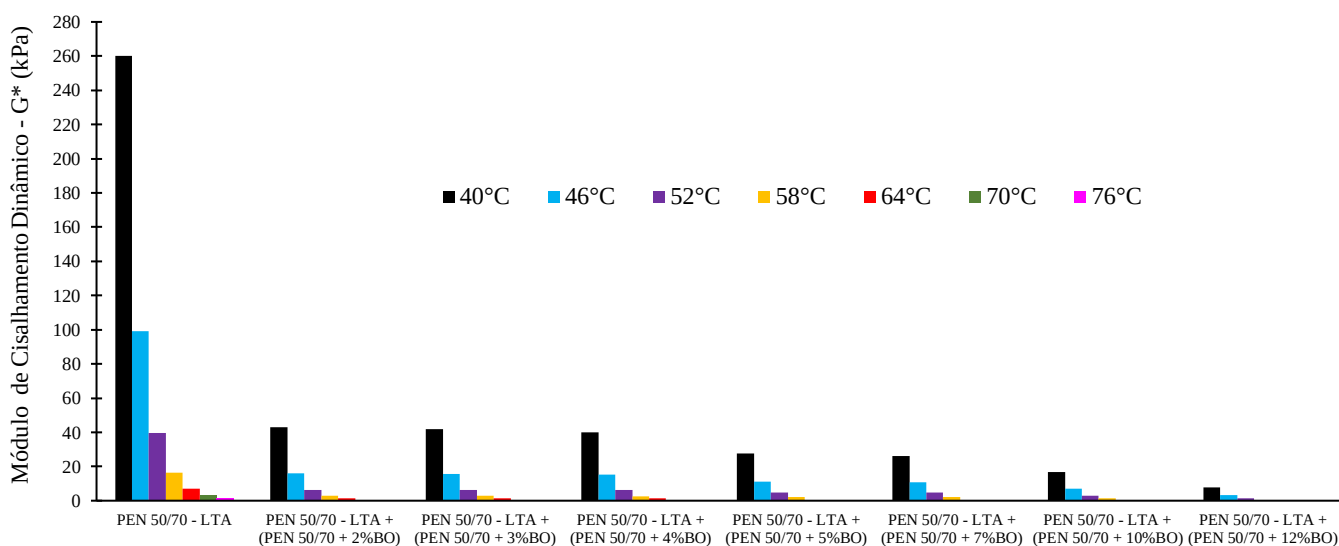


Figura 14 - Módulo de cisalhamento dinâmico (G^*) do ligante asfáltico envelhecido a longo prazo (LTA) com óleo de babaçu: (a) com adição direta do óleo, (b) com adição do ligante modificado pelo óleo.

Além disso, as premissas inicialmente adotadas de que o grau de ativação (DoA) seria de apenas 70% não se confirmaram. Esperava-se um PG contínuo final de 64°C após a mistura do ligante PEN 50/70 - LTA com o óleo de babaçu ou o ligante asfáltico modificado com o óleo. No entanto, todas as amostras com o ligante modificado apresentaram PG inferior a 64°C, enquanto as amostras com adição direta do óleo, apenas 2%, 3% e 4%, indicaram temperatura de PG contínuo superior a 64°C.

Com base nos dados da Tabela 10, pode-se inferir que à medida que mais óleo é adicionado ao ligante, maior é a interação do ligante envelhecido com o agente rejuvenescedor. Assim, para teores acima de 4%, pode-se considerar um grau de interação superior a 70% para maximizar o teor de RAP na mistura reciclada e dosar misturas asfálticas recicladas com maior precisão. Wellner *et al.* (2015) indicam que o DoA varia de 60% a 100%, mas há uma grande lacuna nesse intervalo. Portanto, variáveis como teor e tipo do agente rejuvenescedor e grau de envelhecimento do ligante influenciam nessa estimativa. Isso ressalta a importância da caracterização dos materiais e de um processo de dosagem experimental abrangente para estimar eficientemente a quantidade ideal de cada constituinte.

As amostras PEN 50/70 – LTA + 2%BO e PEN 50/70 – LTA + 3%BO apresentaram valores de $G^*Sen(\delta)$ próximos aos do ligante PEN 50/70 após o RTFO, sugerindo uma melhoria no desempenho à fadiga do ligante envelhecido puro (PEN 50/70 – LTA) devido à redução desse parâmetro. As demais amostras apresentaram valores mais baixos, indicando um notável potencial amolecedor do óleo de babaçu a partir da adição de 3%.

A Figura 15 apresenta a evolução da redução do PG à medida que o óleo de babaçu foi adicionado ao ligante asfáltico envelhecido a longo prazo (PEN 50/70-LTA), considerando duas abordagens: adição direta do óleo ao ligante envelhecido e incorporação do óleo como constituinte do ligante asfáltico virgem antes da mistura com o ligante envelhecido. A tendência de redução do PG com o aumento do teor de óleo foi confirmada pelo alto coeficiente de determinação (R^2), indicando um comportamento linear. A adição direta de até 4% de óleo não foi suficiente para reduzir a rigidez do ligante a ponto de atingir o PG estimado no *blending chart*. Em contrapartida, a incorporação do óleo ao ligante virgem antes da mistura resultou em uma redução mais acentuada do PG, atingindo valores inferiores aos estimados no *blending chart* já a partir do menor teor testado (2%), conforme as proporções apresentadas na Tabela 3. Esse resultado evidencia o maior potencial rejuvenescedor do óleo

quando combinado ao ligante virgem, em comparação à sua adição direta ao ligante envelhecido. Ainda assim, todas as amostras modificadas apresentaram valores de PG próximos aos estimados no *blending chart*.

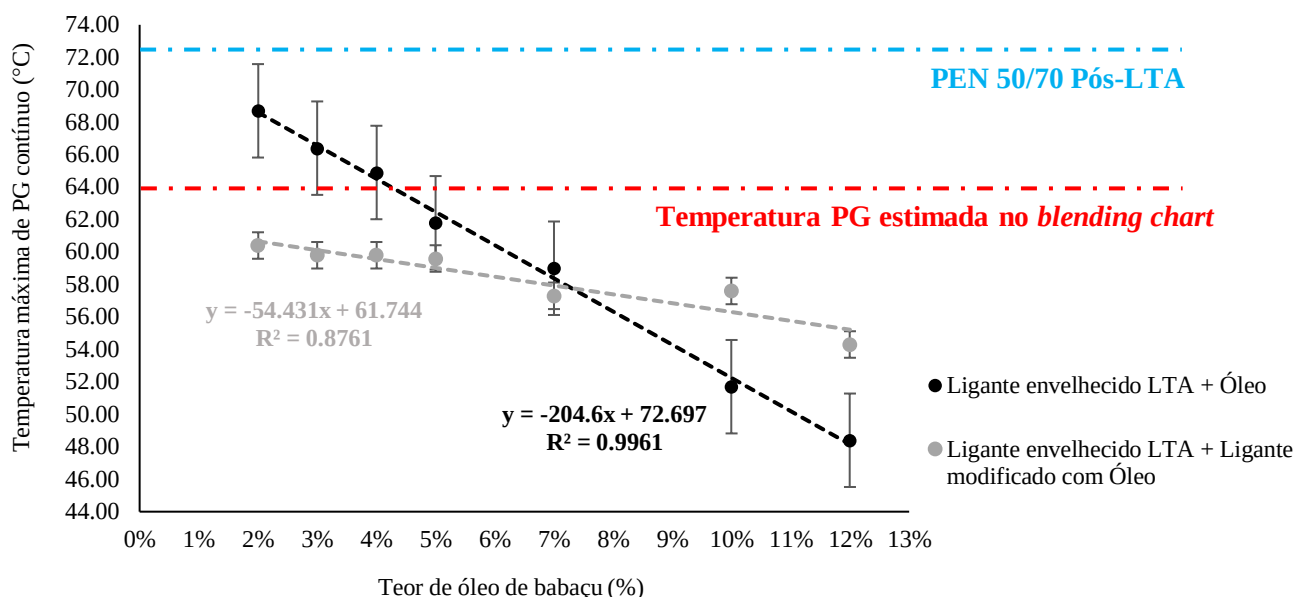


Figura 15 - Valores de PG contínuo das amostras de ligante asfáltico envelhecido a longo prazo (LTA) modificadas com óleo de babaçu, considerando diferentes formas de adição do óleo.

Com base nos valores obtidos para o parâmetro G-R a uma temperatura de 40°C (Tabela 10), verificou-se que a adição de ligante asfáltico virgem modificado com óleo de babaçu ao ligante asfáltico envelhecido proporcionou uma maior redução na suscetibilidade ao trincamento até um teor de 7%, em comparação com a incorporação direta de óleo no ligante. Portanto, pode-se inferir que o uso de ligante asfáltico virgem modificado com óleo de babaçu até um teor de 7% é eficaz na redução da suscetibilidade ao trincamento e pode ser empregado na produção de misturas asfálticas recicladas com RAP.

Hu *et al.* (2024) observaram uma redução no valor do G-R a 15°C na amostra de ligante asfáltico envelhecido a longo prazo no PAV por 20 horas após a adição direta de um rejuvenecedor à base biológica a um teor de 4%, com uma redução de 99,64%. Neste estudo, a redução foi de 82,28% no parâmetro G-R quando 4% de óleo de babaçu foi adicionado diretamente ao ligante envelhecido a longo prazo, alinhando-se com as descobertas de Hu *et al.* (2024). Oldham *et al.* (2021) também observaram uma redução do G-R a 44,7°C em amostras de ligante envelhecidos após a adição de 10% do rejuvenecedor denominado Hy.

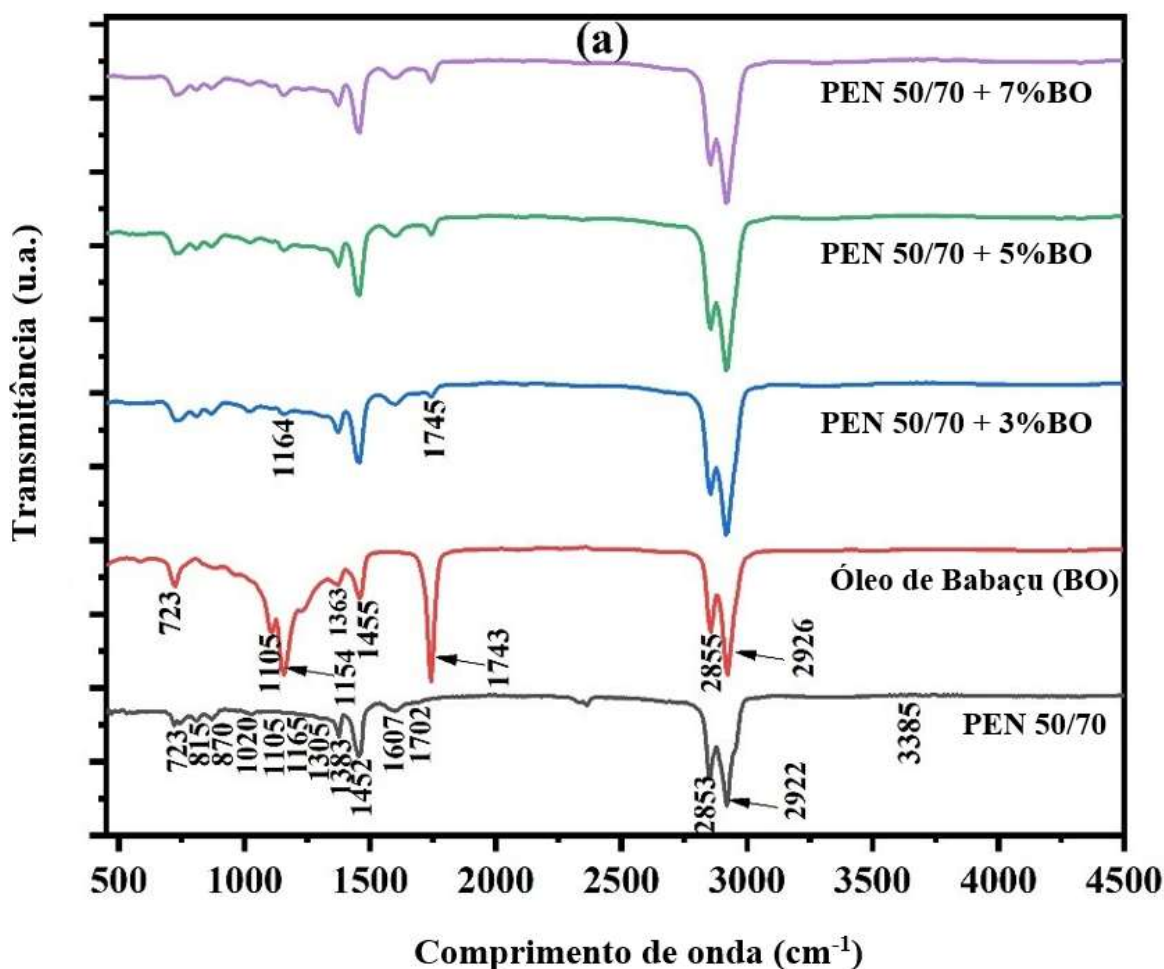
Essa redução foi de 150 kPa, 826 kPa e 600 kPa em relação a ligantes envelhecidos por 20, 40 e 60 horas no PAV a 105°C.

No que se refere à suscetibilidade à deformação plástica, todas as amostras do ligante PEN 50/70 envelhecidas em laboratório a longo prazo (LTA) e modificadas apresentaram-se suscetíveis à temperatura de 70 °C, uma vez que os valores de J_{nr} a 3,2 kPa⁻¹ superaram o limite máximo de 4,5 estabelecido para tráfego padrão (S), conforme a norma ASTM D7405 (2020). Contudo, quando os ensaios foram conduzidos nas respectivas temperaturas máximas de desempenho (PG) das amostras, os resultados enquadraram-se nos critérios exigidos para tráfego padrão (S), com valores de J_{nr} situados entre 2,0 e 4,5, em conformidade com a mesma norma, conforme detalhado na Tabela 10. Os altos valores observados de J_{nr} a 3,2 kPa na temperatura de 70°C sugerem que os teores testados tendem a atuar como rejuvenescedores em ligantes asfálticos com grau de envelhecimento mais severo, permitindo sua aplicação em RAPs mais envelhecidos ou que contenham ligante asfáltico modificado por polímero, ou seja, ligantes de maior rigidez. As amostras de ligante asfáltico envelhecido rejuvenescidas mostraram-se adequadas para uso na faixa de temperatura testada, pois apresentaram valores de J_{nr} , diff inferiores ao limite máximo de 75%, conforme a norma AASHTO M320 (2021).

Melo Neto *et al.* (2023c) investigaram a adição do ácido graxo da borra do óleo de soja em teores de 3%, 5%, 7%, 10%, 15% e 20% como agente rejuvenescedor do ligante asfáltico recuperado do RAP. Os resultados mostraram uma redução do PG contínuo do ligante envelhecido em 1°C, 2°C, 5°C e 6°C com a incorporação do ácido graxo diretamente no ligante nos teores de 3%, 5%, 7% e 10%, respectivamente. Em contraste, neste estudo, a adição do óleo de babaçu diretamente ao ligante envelhecido nos mesmos teores resultou em reduções de 6°C, 10°C, 12°C e 20°C, respectivamente. Isso indica uma maior eficácia na redução da rigidez do ligante com o uso do óleo de babaçu em comparação com o ácido graxo da borra do óleo de soja. No entanto, é importante notar que o grau de envelhecimento do ligante no estudo de Melo Neto *et al.* (2023c) era maior (PG contínuo de 98°C) do que neste estudo (PG contínuo de 72,4°C).

A tecnologia do ensaio FTIR foi utilizada para caracterizar e identificar os grupos funcionais de superfície das diferentes amostras estudadas em números de onda que variam de 450 a 4500 cm⁻¹. A espectroscopia FTIR utiliza a determinação da radiação eletromagnética no domínio espacial ou temporal para avaliar a coerência da fonte radiadora em temperatura

ambiente. Conforme mostrado na Figura 16, as alterações nos grupos funcionais antes e depois do tratamento foram examinadas e comparadas. Para avaliar as mudanças químicas, a espectroscopia FTIR foi aplicada ao ligante asfáltico virgem (PEN 50/70), óleo de babaçu (BO), PEN 50/70/3%BO, PEN 50/70/5%BO, PEN 50/70/7%BO, PEN 50/70 (pós-RTFO), PEN 50/70/3%BO (pós-RTFO), PEN 50/70/5%BO (pós-RTFO), PEN 50/70/7%BO (pós-RTFO), PEN 50/70 (pós-LTA), PEN 50/70/3%BO (pós-LTA), PEN 50/70/5%BO (pós-LTA) e PEN 50/70/7%BO (pós-LTA) (Figura 16). A intensidade dos picos de sulfoxida (S=O) e carbonila (C=O) indicou o grau de rejuvenescimento e envelhecimento; à medida que o asfalto envelhece, ele perde seus compostos oleosos mais leves e as reações de oxidação alteram a composição dos grupos, o que está correlacionado com o aumento de componentes polares (asfaltenos) de maior tamanho molecular.



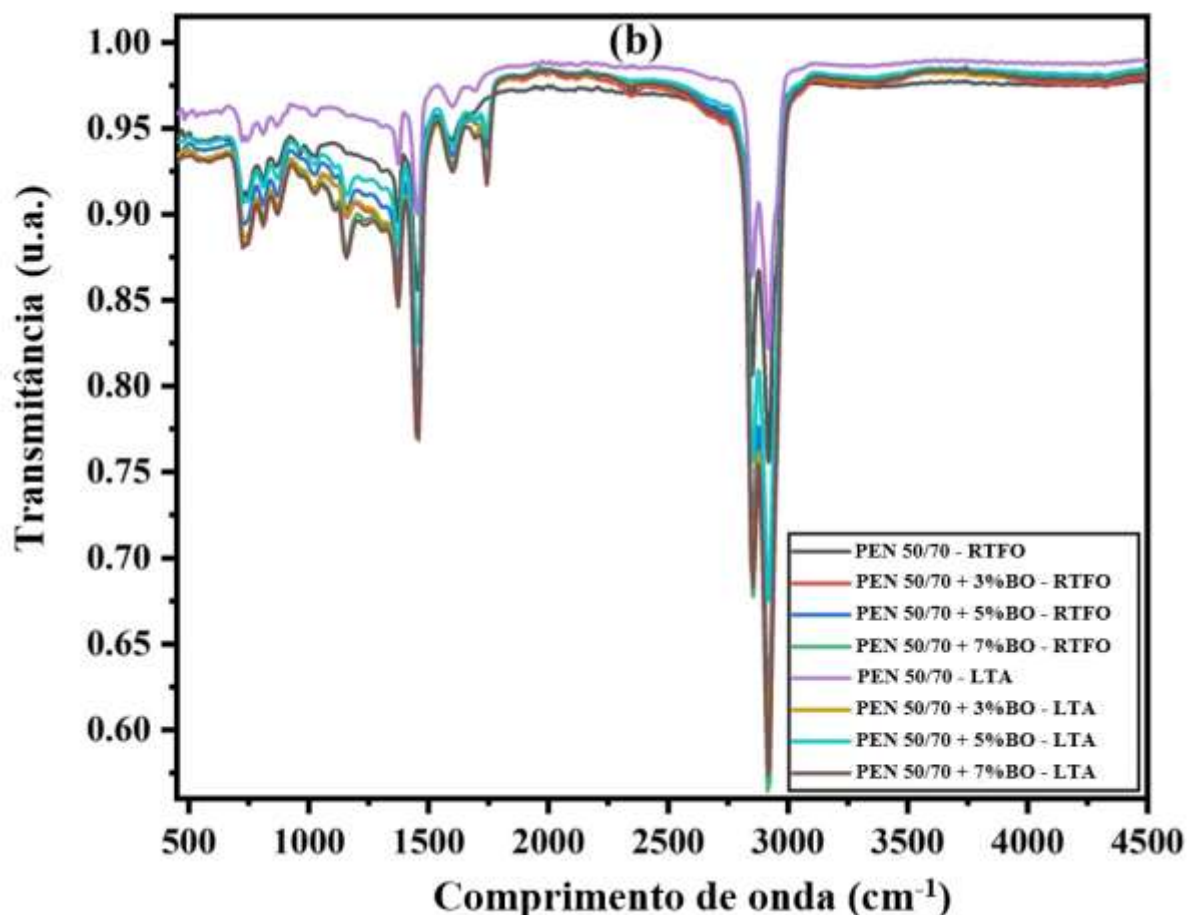


Figura 16 - Curvas de FTIR das amostras estudadas.

A análise FTIR do ligante asfáltico virgem (PEN 50/70) e do ligante asfáltico com óleo de babaçu (PEN 50/70 + 3%BO, PEN 50/70 + 5%BO e PEN 50/70 + 7%BO) é mostrada na Figura 16 (a). A banda larga de absorção de alongamento do OH em um comprimento de onda de 3385 cm^{-1} e as duas bandas de absorção atribuídas ao alceno CH em 2922 e 2853 cm^{-1} são visíveis no espectro FTIR do PEN 50/70. As bandas de absorção em 1020 - 1305 cm^{-1} e 1702 cm^{-1} estão relacionadas à presença de modos de vibração dos grupos sulfoxida (S=O) e carbonila (C=O), respectivamente. A vibração de deformação angular nos grupos metil ($-\text{CH}_3$) ou nas cadeias alifáticas foi associada à banda em 1383 cm^{-1} . Além disso, são exibidos dois picos de absorção — um na vibração de alongamento em 1607 cm^{-1} e o outro na vibração de flexão em 723 cm^{-1} — comprovando a existência do grupo funcional C=C no PEN 50/70. Também foi revelada a presença de anéis aromáticos no PEN 50/70 pela vibração de alongamento em 1452 cm^{-1} e pela vibração de flexão em 815 e 870 cm^{-1} (Zargar *et al.*,

2012; El-Shorbagy; El-Badawy; Gabr, 2019). No caso do BO, os principais constituintes do óleo de babaçu incluem ácido láurico, ácido mirístico, ácido oleico e outros ácidos graxos.

Os componentes de ácidos graxos foram identificados nos espectros FTIR do óleo de babaçu como bandas de absorção características. O espectro do agente rejuvenescedor BO demonstrou bandas características em 723, (1105, 1154), (1363, 1455), 1743 e (2855, 2926) cm^{-1} , referindo-se à deformação assimétrica no plano CH_2 do anel aromático, à vibração de alongamento da ligação C-O do éster (vibrações assimétricas: O-C-C e C-C(=O)-O), às vibrações de flexão da ligação aromática C=C, à deformação axial da ligação carbonila característica (C=O) dos ésteres (cíclicos de cinco membros), e às vibrações de alongamento assimétricas e simétricas dos grupos alifáticos CH_3 e CH_2 dos ácidos graxos, respectivamente (Azahar *et al.*, 2016; Portugal *et al.*, 2018a). Como previsto, não foi encontrada banda de grupo hidroperóxido em 3445 cm^{-1} , sugerindo que o BO não foi oxidado (Ferreira; Faza; Le Hyaric, 2012). Quando o ligante asfáltico virgem foi modificado com óleo de babaçu, as bandas de absorção do PEN 50/70 modificado e do PEN 50/70 de controle foram essencialmente semelhantes, com aumento nas intensidades dos picos. Além disso, comparando os espectros FTIR do ligante asfáltico modificado com BO (PEN 50/70 + 3%BO, PEN 50/70 + 5%BO e PEN 50/70 + 7%BO) e do ligante asfáltico virgem, pode-se observar que as novas bandas de absorção que apareceram em 1164 e 1745 cm^{-1} , respectivamente, são características do alongamento C-O do grupo alquila e do grupo carbonila do éster (Zargar *et al.*, 2012).

A Figura 16 (b) mostra os espectros FTIR do ligante asfáltico envelhecido (PEN 50/70 pós-RTFO e PEN 50/70 pós-LTA) e do PEN 50/70 envelhecido modificado com óleo de babaçu (PEN 50/70 + 3%BO pós-RTFO, PEN 50/70 + 5%BO pós-RTFO, PEN 50/70 + 7%BO pós-RTFO, PEN 50/70 + 3%BO pós-LTA, PEN 50/70 + 5%BO pós-LTA e PEN 50/70 + 7%BO pós-LTA). A formação de produtos de oxidação constitui a principal reação química associada ao envelhecimento do asfalto, envolvendo processos como a desidrogenação e a condensação molecular (Wang *et al.*, 2024). As principais bandas de vibração características do PEN 50/70 original ainda são visíveis nas amostras do ligante asfáltico envelhecido (PEN 50/70 pós-RTFO e PEN 50/70 pós-LTA), sem alteração em sua posição (números de onda). No entanto, a intensidade das bandas diminuiu com o envelhecimento, revelando que a estrutura química do asfalto foi alterada durante o processo de envelhecimento, e o número de grupos funcionais S=O, C=O e C=C no ligante asfáltico

envelhecido a curto e longo prazo aumentou gradualmente (Ren *et al.*, 2023). Comparado ao ligante envelhecido, observa-se que a intensidade dos picos, especialmente o pico de carbonila (C=O), foi significativamente aumentada pela adição do óleo de babaçu, o que melhorou as propriedades reológicas e físicas do ligante asfáltico modificado (Zahoor *et al.*, 2021).

3.3.2. ANÁLISE II

A fim de ampliar a investigação dos efeitos rejuvenescedores do óleo de babaçu em ligantes envelhecidos, realizou-se a análise reológica em ligantes asfálticos recuperados de RAPs distintos a fim de validar os resultados obtidos com o ligante asfáltico envelhecido a longo prazo em laboratório (LTA) rejuvenescido com o óleo. A Tabela 11 apresenta os dados reológicos dos ligantes recuperados modificados.

Tabela 11 - Dados do ensaio de PG para os ligantes asfálticos recuperados.

RAP 1				
Parâmetros	RA 1	RA 1 + (PEN 50/70 + 3%BO)	RA 1 + (PEN 50/70 + 5%BO)	RA 1 + (PEN 50/70 + 7%BO)
PG (°C)	76,00	64,00	64,00	64,00
PG contínuo (°C)	81,00	66,00	65,00	65,00
PG baseado no clima e no tráfego	PG 76-XX (S)	PG 64-XX (S)	PG 64-XX (S)	PG 64-XX (S)
G-R (kPa) a 46°C	22,35	2,12	1,86	1,81
RAP 2				
Parâmetros	RA 2	RA 2 + (PEN 50/70 + 3%BO)	RA 2 + (PEN 50/70 + 5%BO)	RA 2 + (PEN 50/70 + 7%BO)
PG (°C)	76,00	58,00	58,00	52,00
PG contínuo (°C)	78,00	59,00	59,00	57,00
PG baseado no clima e no tráfego	PG 76-XX (S)	PG 58-XX (S)	PG 58-XX (S)	PG 52-XX (S)
G-R (kPa) a 46°C	20,45	1,24	1,09	1,95

Nota: BO: óleo de babaçu, G-R: parâmetro *Glover-Rowe*, PG: *performance grade*, RA: ligante recuperado, (S): *standard*.

Os dados da Tabela 11 indicam que a adição do ligante modificado com óleo de babaçu ao ligante asfáltico recuperado resultou na redução do grau de desempenho do ligante recuperado (RA1) para 64°C em todas as três amostras modificadas. Esse comportamento também foi verificado nos valores de PG contínuo, onde as amostras com 5% e 7% de óleo de babaçu apresentaram valor de 65°C, e a amostra com 3% apresentou 66°C. Esses dados

indicam que o óleo de babaçu manteve sua estabilidade durante o processo de modificação, e que seus efeitos foram proporcionais à quantidade de ligante virgem adicionada. A amostra RA1 + (PEN 50/70 + 3%BO) contém mais ligante virgem que a amostra RA1 + (PEN 50/70 + 5%BO), que, por sua vez, contém mais que a amostra RA1 + (PEN 50/70 + 7%BO). Assim, uma maior quantidade de óleo de babaçu no ligante asfáltico tende a maximizar seus efeitos no ligante recuperado, reduzindo a necessidade de maiores quantidades de ligante virgem.

O ligante asfáltico recuperado (RA2) apresentou comportamento semelhante no PG contínuo, com valores inferiores ao do ligante recuperado puro (RA2) em todas as amostras modificadas. As amostras com 3% e 5% de óleo de babaçu atingiram 59°C, enquanto a amostra com 7% de óleo registrou 57°C. No entanto, como o PG contínuo da amostra com 7% de óleo não atingiu 58°C, ficando em 57°C, este ligante foi classificado com PG de 52°C. As demais amostras modificadas com óleo de babaçu foram classificadas com PG de 58°C.

A Figura 17 apresenta os valores de PG para os ligantes recuperados de ambos os RAPs (RA1 e RA2) após a adição do óleo de babaçu como constituinte de um ligante asfáltico virgem, conforme as proporções definidas na Tabela 5. Embora a amostra RA1 tenha apresentado um PG inferior ao da amostra RA2 inicialmente, após a modificação com o óleo de babaçu, os valores das amostras modificadas de RA2 tornaram-se inferiores aos das amostras modificadas de RA1 nas três proporções testadas (3%, 5% e 7%). Esse comportamento evidencia a variabilidade na composição do RAP e sua influência na interação com agentes rejuvenescedores.

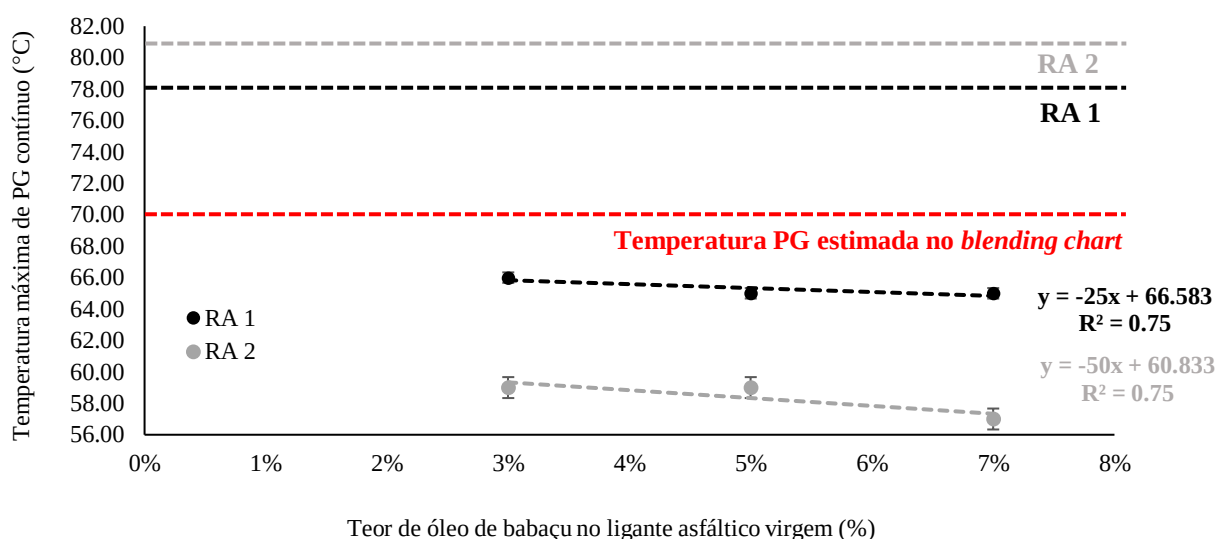


Figura 17 - Valores de PG contínuo dos ligantes recuperados modificados com óleo de babaçu.

Observa-se na Figura 17 que todas as amostras modificadas apresentaram valores de PG inferiores à temperatura estimada no *blending chart*, confirmando o efeito do óleo de babaçu no rejuvenescimento dos ligantes envelhecidos. No entanto, não foi identificada uma tendência linear na redução do PG com o aumento do teor de óleo, uma vez que as proporções de adição foram ajustadas com base no potencial rejuvenescedor de cada teor (Tabela 5). O coeficiente de determinação (R^2) não apresentou valores próximos a 1 devido a pequenas variações nos resultados. Por exemplo, para as amostras de RA1 modificadas, o PG da amostra com 7% de BO foi ligeiramente superior ao da amostra com 5% de BO, enquanto, para as amostras de RA2 modificadas, o PG com 5% de BO foi levemente superior ao da amostra com 3% de BO. Ainda assim, todas as amostras, em ambos os ligantes recuperados, apresentaram valores de PG contínuo equivalentes, indicando uma boa previsão da metodologia do *blending chart*.

Ao modificar o ligante asfáltico envelhecido a longo prazo (LTA) com os mesmos ligantes virgens modificados com óleo de babaçu, observou-se uma redução de dois graus para a amostra com 3% de óleo e de três graus para as amostras com 5% e 7% de óleo. Para o ligante recuperado (RA1), a redução foi de dois graus de PG nos três teores de óleo utilizados. A redução foi de três graus para as amostras com 3% e 5% de óleo, e de quatro graus para a amostra com 7% de óleo com o ligante recuperado (RA2). Ambos os ligantes recuperados exibiram comportamento semelhante, exceto a amostra RA2 + (PEN 50/70 + 7% BO), que apresentou redução de quatro graus, mas quase alcançou o PG de 58°C, indicando comportamento similar às demais amostras, conforme os valores de PG contínuo.

Todas as amostras de ligante asfáltico recuperado (RA1) modificadas apresentaram classificação PG com base no clima e tráfego iguais (PG 64-XX (S)), indicando que, dentro dessa faixa de temperatura de 64°C, as amostras não são suscetíveis à deformação plástica para um nível de tráfego padrão (S). Para o ligante asfáltico recuperado (RA2) modificado com 3% e 5% de óleo de babaçu, a classificação foi de PG 58-XX (S), enquanto a amostra com 7% de óleo foi classificada como PG 52-XX (S), mostrando-se viáveis para tráfego padrão (S) em temperaturas mais amenas de 58°C e 52°C, respectivamente.

Melo Neto *et al.* (2023c) avaliaram um ligante asfáltico recuperado que apresentou PG contínuo de 98°C e, após modificação com adição direta do ácido graxo da borra do óleo de soja nos teores de 3%, 5% e 7%, obteve PG contínuo de 97°C, 96°C e 93°C, respectivamente.

Os autores não observaram uma redução considerável ao adicionar o aditivo diretamente ao ligante envelhecido, corroborando os dados da Tabela 10 para o ligante LTA, onde a adição do ligante modificado com o óleo foi mais eficaz que a adição do óleo diretamente ao ligante. Este resultado também foi evidenciado no estudo de Costa *et al.* (2023), que avaliou os momentos de adição do agente rejuvenescedor no RAP e encontrou resultados mecânicos superiores para as misturas produzidas com o óleo adicionado ao ligante virgem em comparação às misturas produzidas com a adição do óleo diretamente ao RAP.

O parâmetro de módulo de cisalhamento dinâmico (G^*) foi avaliado para verificar o efeito amolecedor do óleo em ligantes recuperados. A adição de aditivos oleosos tende a reduzir a rigidez do ligante envelhecido e, conseqüentemente, os valores de G^* , caracterizando-o como agente rejuvenescedor (Ji *et al.*, 2024). A Figura 18 apresenta os valores de G^* para os ligantes asfálticos recuperados antes e após a modificação com óleo de babaçu.

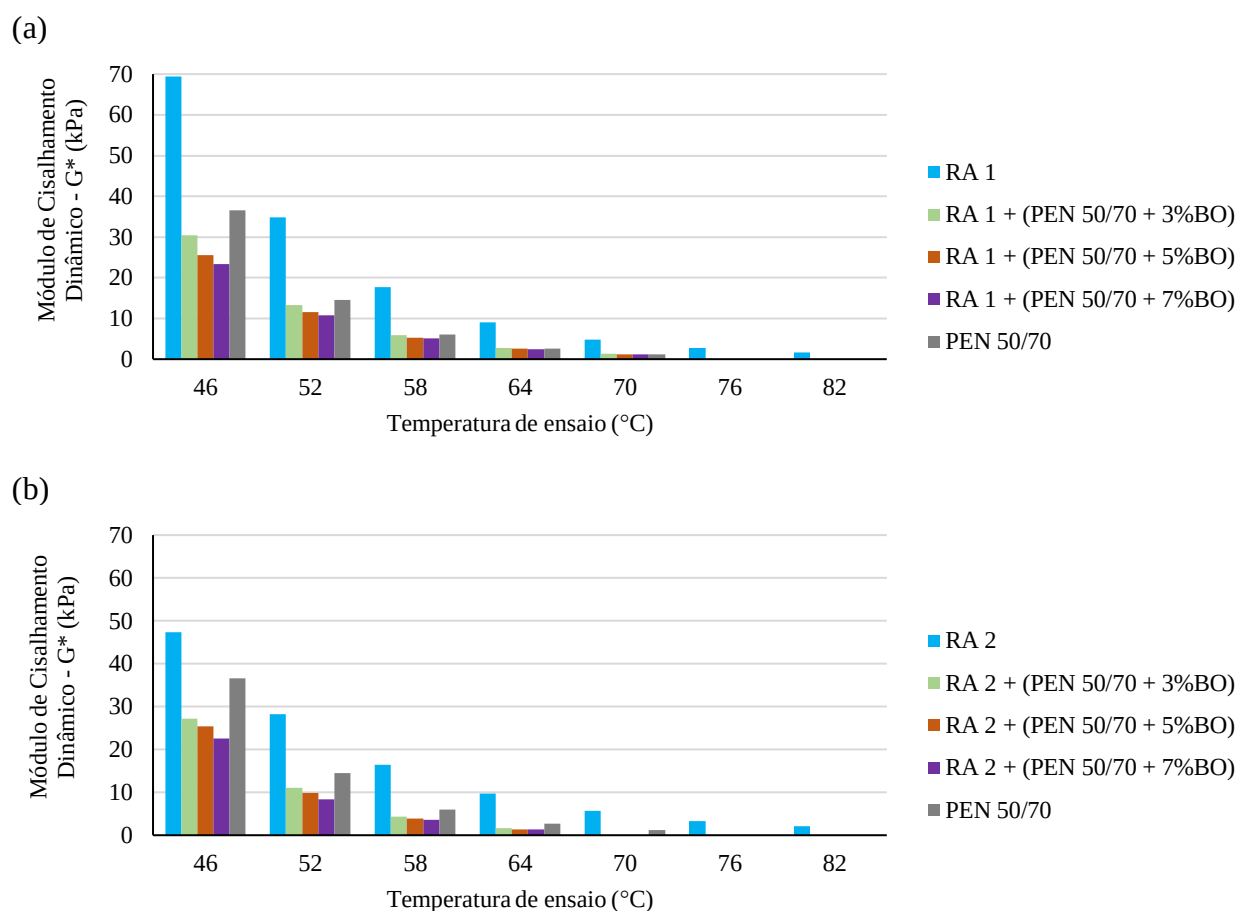


Figura 18 - Valores de módulo de cisalhamento dinâmico (G^*) para os ligantes recuperados: (a) RA1, (b) RA2.

Ao analisar o parâmetro G-R (Tabela 11), observou-se uma redução considerável nas amostras com RA1 de 90,51%, 91,68% e 91,90% com 3%, 5% e 7% de óleo de babaçu, respectivamente, em relação ao ligante recuperado puro RA1. As amostras com RA2 apresentaram reduções de 93,94%, 94,67% e 90,46% com 3%, 5% e 7% de óleo de babaçu, respectivamente. Isso demonstra os efeitos mitigadores do óleo de babaçu na suscetibilidade do ligante envelhecido ao trincamento. Esse comportamento está alinhado com os dados obtidos nas análises do ligante LTA com adição direta do óleo de babaçu e do ligante virgem modificado com o óleo. Hu *et al.* (2024) observaram uma redução no valor do G-R na amostra de ligante asfáltico envelhecido a longo prazo após a adição direta de um rejuvenescedor à base biológica a um teor de 4%, de 99,64%, corroborando as reduções obtidas nesta pesquisa com o uso de 3%, 5% e 7% de óleo de babaçu.

Como mostrado na Figura 18, as amostras modificadas com óleo de babaçu apresentaram uma redução significativa no módulo de cisalhamento dinâmico (G^*) em comparação às amostras sem óleo. O ligante recuperado RA1 exibiu um PG ligeiramente superior ao do ligante RA2, assim como um valor de G^* mais alto; entretanto, a redução de rigidez com a adição de óleo de babaçu foi observada em ambos os ligantes recuperados. Ji *et al.* (2024) encontraram resultados semelhantes ao adicionar óleo de cozinha residual como agente rejuvenescedor em ligantes asfálticos envelhecidos. Os autores apontaram que a adição de 4% de óleo não reduziu o G^* do ligante envelhecido, enquanto o acréscimo de 6% conferiu características semelhantes às do ligante virgem, e de 8% resultou em uma redução significativa até 68°C, com os valores convergindo apenas a partir de 70°C.

Neste estudo, verificou-se que as amostras de ligante recuperado rejuvenescido com óleo de babaçu apresentaram valores de G^* inferiores aos do ligante asfáltico virgem PEN 50/70 nas temperaturas mais baixas (46°C e 52°C), convergindo para rigidez semelhante a partir de 58°C para ambos os ligantes recuperados modificados. Ou seja, nas temperaturas mais altas, as proporções de ligante virgem com ligante envelhecido em todas as configurações (3%, 5% e 7% de óleo) mostraram-se equivalentes e com efeitos semelhantes.

Ren *et al.* (2024) avaliaram o uso de quatro tipos de rejuvenescedores em ligantes asfálticos envelhecidos: bio-óleo, óleo de motor, óleo naftênico e óleo aromático, nas proporções de 1,25%, 2,5%, 3,75%, 5%, 7,5% e 10% por peso do ligante envelhecido. Os pesquisadores concluíram que a ordem de sensibilidade do G^* à dosagem do rejuvenescedor

foi a seguinte: bio-óleo > óleo de motor > óleo naftênico > óleo aromático, independentemente do grau de envelhecimento do ligante asfáltico. Os autores também afirmam que os efeitos do tipo e da dosagem do rejuvenescedor, bem como do grau de envelhecimento do ligante asfáltico na eficiência do rejuvenescimento, podem ser analisados e distinguidos eficazmente com o parâmetro G^* .

Os ligantes asfálticos foram avaliados quanto à suscetibilidade à deformação permanente por meio do ensaio de MSCR. Os dados referem-se às temperaturas dos ligantes asfálticos recuperados RA1 e RA2, bem como às temperaturas de PG de cada amostra, visando verificar a aplicabilidade dos ligantes modificados em temperaturas específicas. A Tabela 12 apresenta os dados obtidos nesse ensaio.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 12, as amostras dos ligantes asfálticos recuperados com óleo de babaçu apresentaram suscetibilidade à deformação permanente na temperatura de PG dos ligantes envelhecidos RA1 e RA2, o que era esperado, dado que os ligantes modificados apresentaram valores de PG inferiores. Contudo, ao analisar as amostras dos ligantes modificados em suas respectivas temperaturas de PG, percebe-se que todas se mostram viáveis para aplicação em rodovias de tráfego padrão (S).

A norma AASHTO M 332 (2023) indica que os ligantes asfálticos constituintes de misturas asfálticas a serem aplicadas em rodovias devem apresentar valores de J_{nr} a 3,2 kPa dentro do intervalo de 2,0 a 4,5, corroborando os dados obtidos nesta pesquisa. As amostras foram analisadas quanto à sensibilidade à variação dos níveis de tensão aplicados de 0,1 kPa e 3,2 kPa pelo parâmetro J_{nr} Diff (%), cujo valor limite é 75%.

Todas as amostras de ligante asfáltico envelhecido rejuvenescido apresentaram valores de J_{nr} Diff inferiores a 75%, viabilizando a aplicação dessas amostras dentro da faixa de temperatura ensaiada. Contudo, as amostras dos ligantes envelhecidos puros (RA1 e RA2) mostraram-se suscetíveis à variação de tensão, com valores de J_{nr} Diff superiores a 75%. Ao considerar que o fluxo de veículos nas rodovias inclui uma variabilidade de veículos leves, tandem duplo e tandem triplo, isso pode ser prejudicial em termos de durabilidade da camada de revestimento asfáltico, acarretando suscetibilidade da mistura asfáltica ao nível de tráfego.

Tabela 12 - Dados do ensaio MSCR dos ligantes asfálticos recuperados.

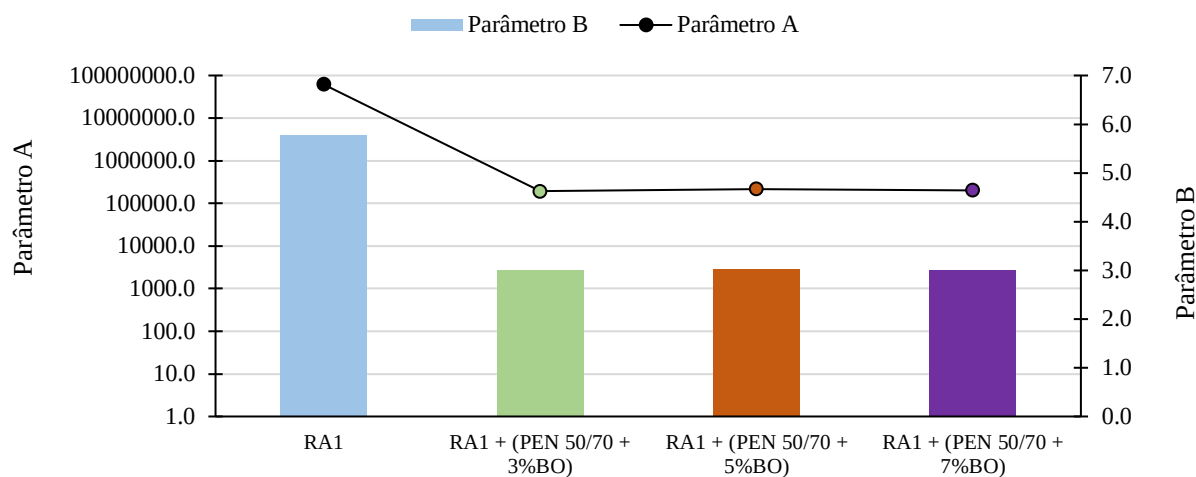
RAP 1					
	Temperatura de ensaio (°C)	RA 1	RA 1 + (PEN 50/70 + 3%BO)	RA 1 + (PEN 50/70 + 5%BO)	RA 1 + (PEN 50/70 + 7%BO)
Jnr a 0,1 kPa	52	NA	NA	NA	NA
	58	NA	NA	NA	NA
	64	NA	3,47	3,61	3,58
	70	1,45	8,11	8,22	8,44
	76	2,51	NA	NA	NA
	82	NA	NA	NA	NA
Jnr a 3,2 kPa	52	NA	NA	NA	NA
	58	NA	NA	NA	NA
	64	NA	4,18	4,44	4,50
	70	3,40	9,32	10,11	10,40
	76	4,47	NA	NA	NA
	82	NA	NA	NA	NA
Jnr Diff (%)	52	NA	NA	NA	NA
	58	NA	NA	NA	NA
	64	NA	20,47	22,94	26,37
	70	134,29	15,02	22,99	23,25
	76	78,17	NA	NA	NA
	82	NA	NA	NA	NA
RAP 2					
	Temperatura de ensaio (°C)	RA 2	RA 2 + (PEN 50/70 + 3%BO)	RA 2 + (PEN 50/70 + 5%BO)	RA 2 + (PEN 50/70 + 7%BO)
Jnr a 0,1 kPa	52	NA	NA	NA	1,31
	58	NA	3,48	1,68	NA
	64	NA	NA	NA	NA
	70	NA	29,29	16,74	NA
	76	0,99	NA	NA	35,30
	82	2,54	NA	NA	NA
Jnr a 3,2 kPa	52	NA	NA	NA	1,84
	58	NA	4,28	2,14	NA
	64	NA	NA	NA	NA
	70	NA	33,74	20,61	NA
	76	4,20	NA	NA	41,14
	82	10,91	NA	NA	NA
Jnr Diff (%)	52	NA	NA	NA	41,01
	58	NA	23,10	27,21	NA
	64	NA	NA	NA	NA
	70	NA	NA	NA	NA
	76	325,80	15,22	23,11	16,54
	82	329,11	NA	NA	NA

Nota: BO: óleo de babaçu, Diff: diferencial, Jnr: compliância não recuperável, NA: não aplicável, RA: ligante recuperado.

Dessa forma, faz-se necessário investigar a resistência dos ligantes asfálticos ao carregamento cíclico para estimar a vida de fadiga e verificar o comportamento quanto à amplitude de deformação. Esses parâmetros foram avaliados por meio do ensaio LAS, realizado a 19°C, utilizando-se o critério de falha para o início do dano baseado na abordagem energética a partir da energia de pseudo-deformação ou pseudoenergia máxima (PSE). A Figura 19 apresenta os dados dos parâmetros A e B na resistência ao dano, obtidos por meio

do ensaio de varredura linear de amplitude para as amostras dos ligantes envelhecidos e rejuvenescidos.

(a)



(b)

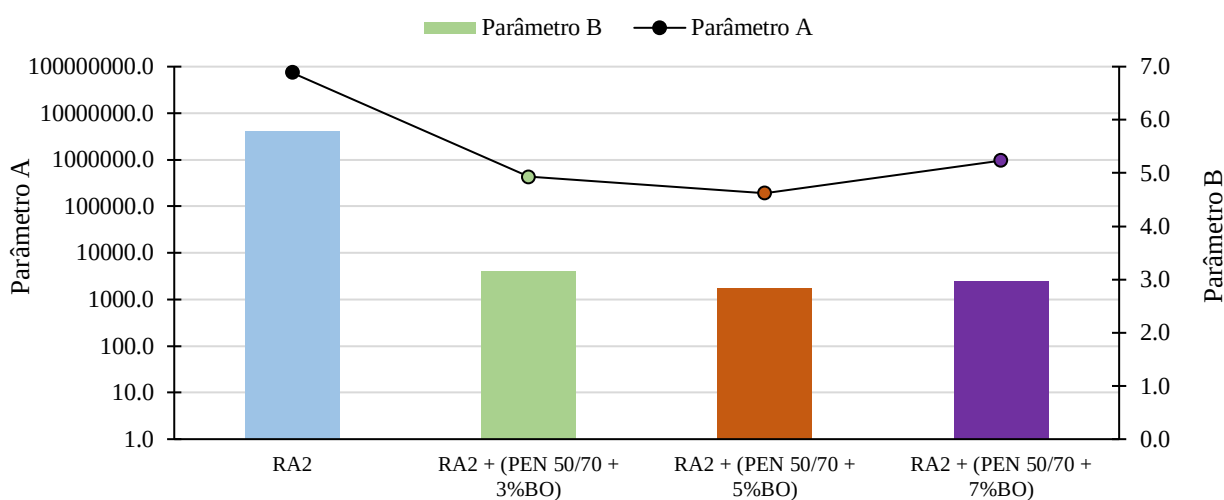


Figura 19 - Parâmetro A e Parâmetro B obtidos no ensaio LAS: (a) RA1, (b) RA2.

Na avaliação dos parâmetros, considerando que o parâmetro A está relacionado à variação da integridade do material devido ao dano acumulado, valores maiores de A indicam que a amostra manteve melhor sua integridade inicial. Os dados da Figura 19 indicam que as amostras de ligante recuperado não rejuvenescido apresentaram maiores valores em comparação às amostras rejuvenescidas. Os valores para as amostras do ligante recuperado

RA2, com e sem óleo de babaçu, foram ligeiramente maiores que os obtidos para as amostras do ligante recuperado RA1.

Lopes *et al.* (2023) analisaram a aplicação de distintos protocolos de envelhecimento ao ligante asfáltico PEN 50/70 e verificaram que as amostras envelhecidas a longo prazo apresentaram maiores valores do parâmetro A em relação às amostras não envelhecidas ou com menor grau de envelhecimento (rigidez/oxidação). Contudo, Kodrat *et al.* (2007) relatam que maiores valores absolutos do parâmetro B indicam que a vida de fadiga do material decresce a uma taxa maior quando a amplitude de deformação aumenta, enquanto menores valores absolutos de B indicam que a vida de fadiga do ligante decresce a uma taxa menor com o aumento da amplitude de deformação.

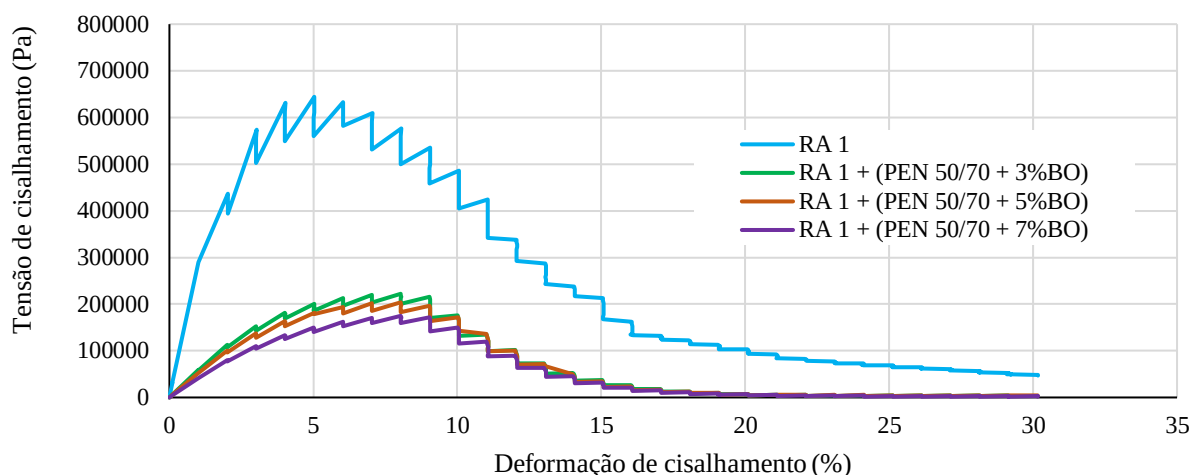
A análise do parâmetro B está relacionada à inclinação da reta da frequência versus módulo de armazenamento (G'). Dessa forma, as amostras dos ligantes asfálticos recuperados não rejuvenescidos (RA1 e RA2) apresentaram maiores valores de B, indicando que são mais suscetíveis à fadiga à medida que a amplitude de deformação aumenta. Esses aumentos do parâmetro B não são desejáveis para os ligantes asfálticos, pois indicam maior suscetibilidade a deformações sob variações de temperatura.

As amostras rejuvenescidas apresentaram valores inferiores do parâmetro B em relação às amostras não rejuvenescidas, onde os dados de RA1 e RA2 foram iguais (5,78). Os valores foram semelhantes entre as amostras rejuvenescidas para ambos os tipos de ligantes, apontando efeitos equivalentes quanto ao teor e à proporção de óleo utilizado na produção das amostras, convergindo para o mesmo desempenho quanto à fadiga. As amostras com 3%, 5% e 7% de óleo apresentaram uma redução do parâmetro de 47,88%, 47,71% e 48,08% para as amostras com RA1 e 45,37%, 50,88% e 48,53% para as amostras com RA2. Portanto, observa-se uma melhoria de aproximadamente 50% quanto à suscetibilidade à fadiga sob maiores variações de amplitude de deformação.

A Figura 20 apresenta os gráficos de tensão versus deformação obtidos no ensaio LAS sob deformação controlada para os ligantes recuperados. Ambos os ligantes asfálticos recuperados (RA1 e RA2) apresentaram alta rigidez e uma deformação por cisalhamento de cerca de 5%, corroborando o estudo de Elkashef *et al.* (2018b), que obtiveram essa deformação para um ligante asfáltico recuperado não rejuvenescido. Lopes *et al.* (2023) também verificaram aumento da tensão cisalhante após submeter o ligante asfáltico PEN

50/70 a processos de envelhecimento a longo prazo, conforme verificado nas amostras de ligante recuperado dos dois RAPs. Ou seja, ligantes envelhecidos tendem a apresentar maiores valores de tensão cisalhante devido à maior rigidez. Esses autores observaram uma taxa de deformação cisalhante para as amostras envelhecidas próxima a 7%.

(a)



(b)

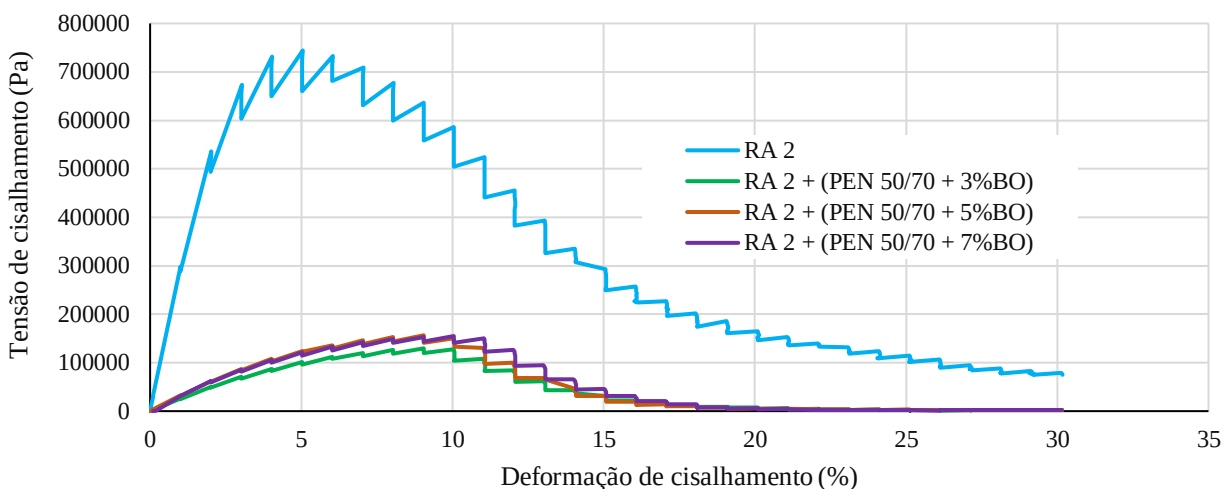


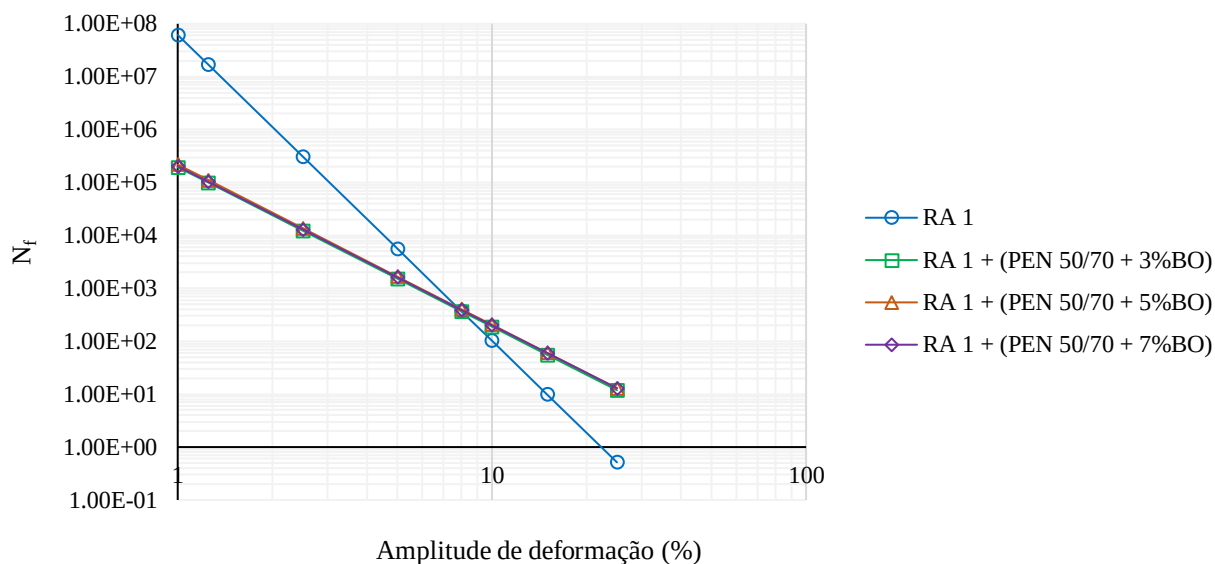
Figura 20 - Curvas de tensão versus deformação dos ligantes asfálticos recuperados.

Os ligantes rejuvenescidos, nas três proporções testadas, mostraram maiores taxas de deformação e menor rigidez para ambos os ligantes recuperados. Esse comportamento é consistente com o estudo de Elkashef *et al.* (2018b), que utilizou um rejuvenescedor de óleo de soja na proporção de 6% sobre o peso do ligante asfáltico recuperado.

Rathore *et al.* (2022) avaliaram a vida de fadiga de ligantes recuperados e rejuvenescidos com diferentes agentes (à base de óleo de *tall*, vegetal, bio-óleo e petróleo) na proporção de 5% e envelhecidos por 216 horas a 85°C, observando uma taxa de deformação em torno de 10%. Esses resultados corroboram esta pesquisa, onde as amostras RA1 com óleo de babaçu apresentaram taxa de deformação cisalhante em torno de 8%, e as amostras RA2, em torno de 10%. Conclui-se que a adição de óleo de babaçu aumentou a taxa de deformação cisalhante dos ligantes recuperados, indicando que ligantes mais macios apresentam menor tensão de pico e maior deformação em comparação aos mais rígidos.

Diante disso, Teymourpour e Bahia (2014) recomendam calcular o número de ciclos até a falha (N_f) em diferentes níveis de deformação, como forma de estabelecer uma relação entre a vida de fadiga do ligante e parâmetros de campo. Por meio do princípio de dano contínuo (VECD) foi possível determinar um modelo de fadiga para cada ligante asfáltico, derivado da relação entre a carga aplicada e a vida de fadiga do material, obtida das análises do LAS a 19°C. A Figura 21 apresenta a estimativa da vida de fadiga dos ligantes asfálticos recuperados, com e sem adição do óleo de babaçu, obtida nas análises do dano contínuo viscoelástico (VECD).

(a)



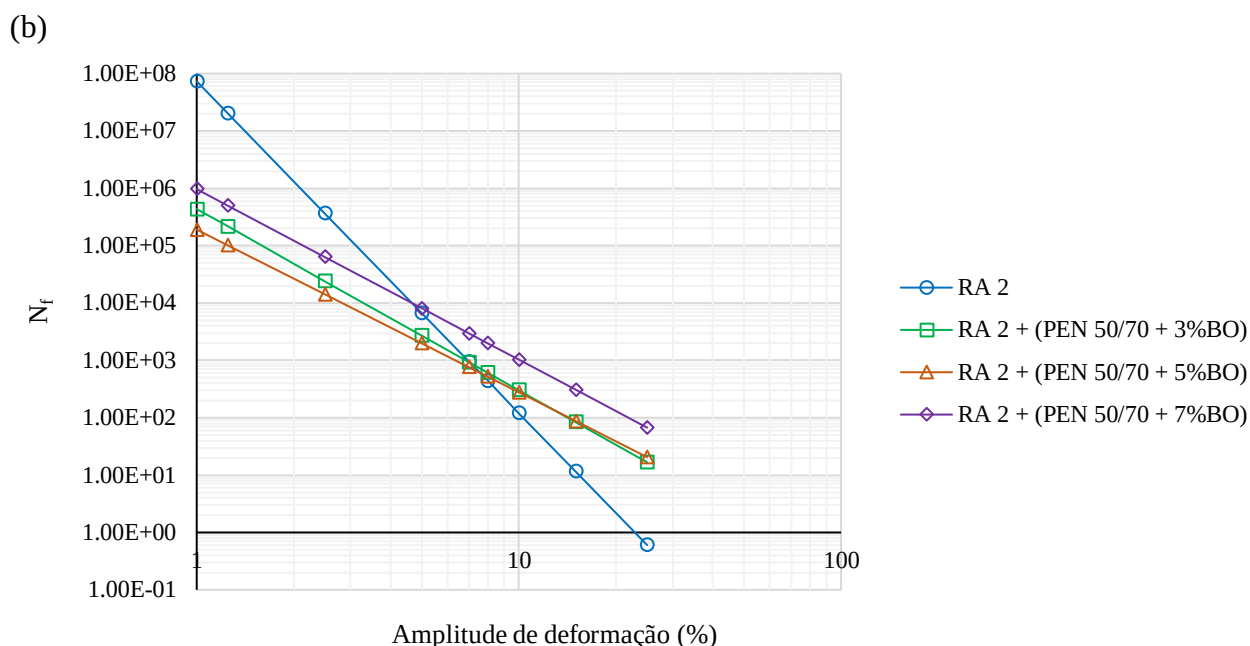


Figura 21 - Estimativa da vida de fadiga dos ligantes asfálticos recuperados.

Nascimento (2015) aponta que baixos níveis de deformação, em torno de 3%, representam pavimentos com baixos níveis defletoométricos, com comportamento semelhante ao de um pavimento rígido, enquanto altos níveis de deformação representam pavimentos com altos níveis defletoométricos, assemelhando-se a um pavimento flexível. Segundo Nuñez *et al.* (2014), o número de ciclos até a falha (N_f) representa as condições a que o material pode ser submetido e está relacionado ao volume de tráfego suportado em função das deformações aplicadas, que são um indicador da estrutura do pavimento ou das deformações admissíveis no pavimento.

A Figura 21 indica que as amostras de ligante recuperado sem óleo (RA1 e RA2) apresentaram maior resistência (maior número de ciclos até a falha) para baixas amplitudes de deformação. Com o aumento das amplitudes de deformação, observa-se comportamentos variados, onde, para as amostras de ligante asfáltico recuperado tipo RA1, a partir de 8% de amplitude de deformação, as amostras rejuvenescidas apresentaram maior resistência com maiores valores de N_f .

Para as amostras de ligante recuperado do tipo RA2, observou-se melhorias no desempenho à fadiga das amostras rejuvenescidas com 3%, 5% e 7% de óleo a partir de 7%, 8% e 5% de amplitude de deformação, respectivamente. Isso indica que a adição do óleo ao

ligante envelhecido contribuiu para o ganho de características flexíveis, pois os ligantes recuperados não rejuvenescidos tendem a se comportar como uma camada de alta rigidez, enquanto os ligantes rejuvenescidos se comportam como pavimentos flexíveis. A Tabela 13 apresenta as equações do tipo potência que representam os modelos de previsão da vida de fadiga para os ligantes asfálticos avaliados, conforme observado na Figura 21.

Tabela 13 - Equações das curvas de vida de fadiga dos ligantes asfálticos recuperados.

Amostra de ligante asfáltico recuperado	Equação	R ²
RA1	$N_f = 6E+07x^{-5,778}$	1,00
RA1 + (PEN50/70+3%BO)	$N_f = 193801x^{-3,013}$	1,00
RA1 + (PEN50/70+5%BO)	$N_f = 218397x^{-3,023}$	1,00
RA1 + (PEN50/70+7%BO)	$N_f = 202593x^{-3,001}$	1,00
RA2	$N_f = 7E+07x^{-5,784}$	1,00
RA2 + (PEN50/70+3%BO)	$N_f = 434865x^{-3,158}$	1,00
RA2 + (PEN50/70+5%BO)	$N_f = 191156x^{-2,839}$	1,00
RA2 + (PEN50/70+7%BO)	$N_f = 967986x^{-2,975}$	1,00

Nota: BO: óleo de babaçu, N_f: número de ciclos até a falha, RA: ligante recuperado, R²: coeficiente de determinação, x: amplitude de deformação (%).

Verifica-se por meio da Tabela 13 que as equações de vida de fadiga obtidas para os ligantes RA1 e RA2 foram semelhantes, indicando comportamentos equivalentes. As amostras dos ligantes rejuvenescidos também apresentaram resultados parecidos para os três teores testados, indicando efeitos semelhantes na resistência à fadiga. Chen e Bahia (2021) também verificaram que a vida de fadiga do ligante a 2,5% de deformação geralmente é maior à medida que se verifica aumento no grau de envelhecimento, e que à medida que se aumenta a amplitude de deformação, a vida à fadiga tende a diminuir com o aumento do grau de envelhecimento em várias taxas, dependendo do tipo de ligante. Isso corrobora com os dados obtidos nesta pesquisa, em que o uso do óleo de babaçu reduziu o grau de envelhecimento dos ligantes recuperados, melhorando o desempenho à fadiga em maiores amplitudes de deformação.

Underwood (2011) e Hintz e Bahia (2013) propuseram a determinação de um parâmetro definido como Fator de Fadiga do Ligante (FFL), a partir da área abaixo das curvas de fadiga para os níveis de tensão de 1,25% e 2,50%. Esse parâmetro é determinado por meio dos dados do ensaio LAS a 19°C, utilizando o modelo viscoelástico de dano contínuo

simplificado (S-VECD). O cálculo desse parâmetro é realizado conforme apresentado na Equação 3.

$$FFL = \frac{(\log(N_{f1,25\%}) + \log(N_{f2,5\%}))}{2} \times (\log(0,025) - \log(0,0125)) \quad (3)$$

Onde:

- $N_{f1,25\%}$ é a vida de fadiga do ligante a 1,25% de deformação;
- $N_{f2,5\%}$ é a vida de fadiga do ligante a 2,5% de deformação.

Contudo, Underwood (2011) e Hintz e Bahia (2013) avaliam a vida de fadiga apenas sob baixas amplitudes de deformação, faixa em que materiais mais rígidos tendem a apresentar maior vida de fadiga, podendo equivocadamente inferir que materiais de elevada rigidez são mais resistentes ao trincamento por fadiga. A fim de suprir essa lacuna, realizou-se a determinação do FFL sob maiores amplitudes de deformação para analisar os efeitos das amplitudes de deformação utilizadas no cálculo na caracterização dos ligantes frente ao trincamento por fadiga. Assim, a análise foi realizada da seguinte maneira: FFL para os níveis de tensão de 1,25% e 2,5%; FFL para os níveis de tensão de 2,5% e 5%; FFL para os níveis de tensão de 5% e 10%; FFL para os níveis de tensão de 10% e 15%; e, por fim, FFL para os níveis de tensão de 15% e 25%.

Para cada uma dessas análises, utilizou-se a Equação 3 e substituiu os valores referentes a N_f 1,25% pelas menores amplitudes do par e os valores referentes a N_f 2,5% pelos maiores valores de cada par. A Tabela 14 apresenta os valores obtidos para cada análise proposta por amostra de ligante asfáltico recuperado.

Tabela 14 - FFL dos ligantes recuperados sob diferentes amplitudes de deformação.

Amostras	FFL (1,25% e 2,5%)	FFL (2,5% e 5%)	FFL (5% e 10%)	FFL (10% e 15%)	FFL (15% e 25%)
RA1	1,914	1,391	0,952	0,404	0,333
RA1 + (PEN50/70+3%BO)	1,367	1,094	0,865	0,426	0,446
RA1 + (PEN50/70+5%BO)	1,382	1,108	0,878	0,434	0,455
RA1 + (PEN50/70+7%BO)	1,374	1,102	0,874	0,432	0,453
RA2	1,937	1,413	1,024	0,495	0,524
RA2 + (PEN50/70+3%BO)	1,462	1,176	0,963	0,507	0,584
RA2 + (PEN50/70+5%BO)	1,378	1,121	0,930	0,493	0,572
RA2 + (PEN50/70+7%BO)	1,580	1,311	1,111	0,596	0,700

Nota: BO: óleo de babaçu, FFL: fator de fadiga do ligante, RA: ligante recuperado.

Nascimento (2015) determinou uma classificação para ligantes asfálticos com base nos valores de FFL para baixas amplitudes de deformação (1,25% e 2,5%). O autor indica que FFL maiores que 1,57 são classificados como excelentes e entre 1,31 e 1,48 como intermediários. Entre as amostras analisadas, observa-se que as amostras dos ligantes recuperados não rejuvenescidos (RA1 e RA2) são classificadas como excelentes, juntamente com a amostra RA2 + (PEN50/70+7%BO); enquanto as demais amostras são classificadas como intermediárias. No entanto, é notável que à medida que o FFL é calculado sob maiores amplitudes de deformação, as amostras de ligante rejuvenescidas em todos os teores de óleo de babaçu apresentam valores de FFL superiores às amostras não rejuvenescidas (RA1 e RA2), principalmente entre 15% e 25% de amplitude de deformação.

É importante ressaltar que essa descrição de bom comportamento à fadiga para as amostras não rejuvenescidas foi obtida para pequenas deformações, visto que o FFL proposto por Underwood (2011) e Hintz e Bahia (2013) é calculado com base em 1,25% e 2,5% de amplitude de deformação. Dessa forma, os resultados convergem com os obtidos por Chen e Bahia (2021), onde foi verificado que o endurecimento devido ao envelhecimento pode melhorar a vida à fadiga apenas se os ligantes forem submetidos a deformações muito pequenas.

A análise química por meio do ensaio FTIR teve como objetivo comparar e caracterizar as variações nos grupos funcionais e nas ligações químicas das amostras na faixa de comprimento de onda de 450 a 4450 cm^{-1} . O FTIR permite identificar picos relacionados a modos vibracionais, como vibrações de flexão e de alongamento. É utilizada na análise das amostras estudadas para identificar qualitativamente aditivos orgânicos.

A Figura 22 apresenta os espectros de FTIR do ligante asfáltico virgem (PEN 50/70), RA1, RA2, solvente percloroetileno, RA1 com solvente, RA2 com solvente, óleo de babaçu (BO), RA1 + (PEN 50/70 + 3%BO), RA1 + (PEN 50/70 + 5%BO), RA1 + (PEN 50/70 + 7%BO), RA2 + (PEN 50/70 + 3%BO), (RA2 + (PEN 50/70 + 5%BO) e RA2 + (PEN 50/70 + 7%BO). Conforme ilustrado na Figura 22 (a), RA1 e RA2 apresentaram as mesmas bandas características do ligante asfáltico virgem. As bandas em 721,810 e 862 cm^{-1} resultaram da vibração de flexão C-H nos anéis aromáticos, o que confirmou o caráter orgânico do ligante, que continha grupos aromáticos, insaturados e saturados. O pico na faixa de 1018-1300 cm^{-1}

indicou as vibrações de alongamento do grupo sulfoxida (S=O) e, em 1380 cm^{-1} , estava relacionado à vibração de deformação angular em cadeias alifáticas ou grupos metil ($-\text{CH}_3$).

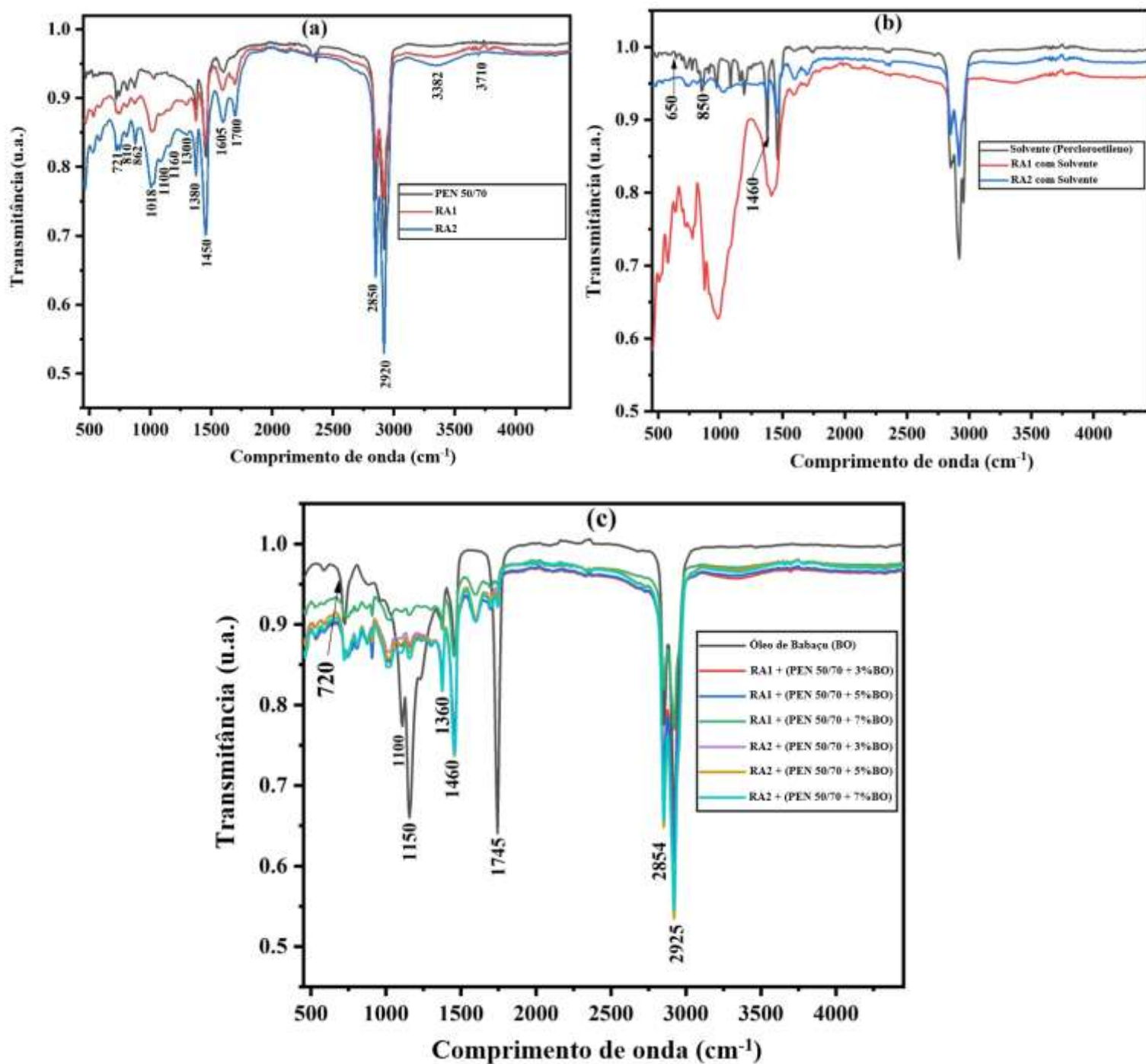


Figura 22 - Curvas de FTIR dos ligantes asfálticos recuperados e rejuvenescidos.

O sinal de alta intensidade em 1450 cm^{-1} foi associado à deformação angular dos grupos metileno ($-\text{CH}_2-$), enquanto o pico em 1605 cm^{-1} denotou a vibração das ligações insaturadas $\text{C}=\text{C}$ no anel benzeno. Além disso, a banda em 1700 cm^{-1} representou as vibrações de alongamento dos grupos carbonila ($\text{C}=\text{O}$). As bandas fortes em torno de 2850 e 2920 cm^{-1} foram atribuídas às vibrações de alongamento simétrico e assimétrico das cadeias alifáticas (grupos metino ($-\text{CH}-$), metil ($-\text{CH}_3$) e metileno ($-\text{CH}_2-$)) no ligante asfáltico (Silva Lopes *et al.*, 2023). As bandas fracas em torno de 3382 e 3710 cm^{-1} foram geradas pela vibração de água livre ou ligada e CO_2 no ar ambiente. Notavelmente, a transmitância e a intensidade da maioria dos grupos funcionais aumentaram quando os ligantes asfálticos foram recuperados, o que representa uma diferença importante entre os três materiais (ligante asfáltico virgem, RA1 e RA2), revelando o sucesso na preparação dos ligantes asfálticos recuperados. Além disso, a intensidade das bandas em RA2 foi maior do que em RA1. O aumento na transmitância e intensidade de $\text{C}=\text{O}$ indicou a formação de grupos funcionais, como ácidos carboxílicos, ésteres, aldeídos e cetonas durante o processo de envelhecimento do ligante asfáltico. O aumento em $\text{S}=\text{O}$ também demonstrou que um grupo funcional polar sulfoxida foi formado quando o elemento enxofre se combinou com oxigênio.

A Figura 22 (b) exibe duas bandas de absorção características do percloroetileno ou tetracloroetileno (C_2Cl_4), um hidrocarboneto clorado. As vibrações de alongamento de $\text{C}-\text{Cl}$ e $\text{C}=\text{C}$ foram observadas em $650\text{-}850\text{ cm}^{-1}$ e 1460 cm^{-1} , respectivamente. Diferentes modos vibracionais da molécula podem causar pequenos picos adicionais. No caso de RA1 com solvente e RA2 com solvente, elas mantiveram as características do ligante asfáltico recuperado, além dos grupos funcionais do solvente utilizado.

A descrição dos grupos funcionais do óleo de babaçu (BO), RA1 + (PEN 50/70 + 3%BO), RA1 + (PEN 50/70 + 5%BO), RA1 + (PEN 50/70 + 7%BO), RA2 + (PEN 50/70 + 3%BO), RA2 + (PEN 50/70 + 5%BO) e RA2 + (PEN 50/70 + 7%BO) foi ilustrada na Figura 22 (c). O óleo de babaçu é composto principalmente por ácido mirístico, ácido oleico, ácido láurico e outros ácidos graxos. Esses componentes de ácidos graxos apareceram como bandas de absorção características nos espectros de FTIR do óleo de babaçu. Os espectros exibiram sinais quase idênticos em 720 , $(1100, 1150)$, $(1360, 1460)$, 1745 e $(2854, 2925)\text{ cm}^{-1}$, que correspondem à vibração de flexão $\text{C}-\text{H}$ nos anéis aromáticos, à vibração de alongamento $\text{C}-\text{O}$ da ligação éster, às vibrações de flexão dos grupos metil e metileno, ao alongamento $\text{C}=\text{O}$ no grupo éster dos triglicerídeos e ao alongamento $\text{C}-\text{H}$ nas ligações alifáticas $\text{C}-\text{H}$ das cadeias

de ácidos graxos, respectivamente. Como esperado, não foi detectada banda de grupo hidroperóxido próxima de 3440 cm^{-1} , indicando que o óleo de babaçu não sofreu oxidação (Ferreira; Faza; Le Hyaric, 2012). No caso dos gráficos de RA + BO, a intensidade e a transmitância das bandas, especialmente em RA1 + (PEN 50/70 + 7%BO), diminuíram em comparação com RA1, confirmando que a rigidez dos ligantes recuperados foi significativamente reduzida pela adição de óleo de babaçu. Assim, a composição do ligante asfáltico envelhecido foi melhorada e rejuvenescida pelo uso do BO para modificar o ligante asfáltico recuperado do RAP, produzindo uma mistura regenerada com alto módulo e elevado teor de RAP.

3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação do programa experimental para a incorporação do óleo de babaçu no ligante asfáltico permitiu obter as seguintes conclusões:

- (1) A adição de óleo de babaçu reduziu consideravelmente a rigidez do ligante asfáltico classificado com penetração 50/70, evidenciada pela diminuição da viscosidade e PG.
- (2) Ligantes contendo 7%, 10% e 12% de óleo de babaçu têm potencial para possibilitar a produção de misturas asfálticas mornas, com temperaturas finais de produção variando entre 150°C e 141°C , oferecendo alternativas para processos de pavimentação mais sustentáveis.
- (3) O envelhecimento a longo prazo resultou em uma perda de massa considerável em todas as amostras, exceto em misturas com teores de óleo acima de 3%, sugerindo uma possível mitigação dos efeitos do envelhecimento térmico com a adição deste aditivo.
- (4) Após o processo de envelhecimento a longo prazo, houve um aumento na rigidez das amostras, indicado pelo incremento na classificação PG e nos valores de G^* , demonstrando a eficácia do método de envelhecimento utilizado.
- (5) Ligantes com maiores teores de óleo de babaçu mostraram maior susceptibilidade à deformação permanente em temperaturas elevadas. No entanto, todas as amostras atenderam aos requisitos de desempenho para tráfego padrão nas respectivas temperaturas de classificação PG, destacando a viabilidade da aplicação desses ligantes.

- (6) O uso de ligante asfáltico modificado com óleo de babaçu foi mais eficaz na redução da rigidez do ligante envelhecido em comparação com a adição de óleo apenas ao ligante envelhecido.
- (7) À medida que mais óleo de babaçu é adicionado ao ligante, observa-se uma maior interação do ligante envelhecido com o aditivo, permitindo uma interação potencial superior a 70% para teores acima de 4%, o que pode maximizar o teor de RAP na mistura reciclada.
- (8) O ligante asfáltico modificado com óleo de babaçu demonstrou classificação PG e custos de produção similares aos ligantes modificados com óleos de algodão e girassol.
- (9) Ligantes recuperados dos RAPs com 3%, 5% e 7% de óleo de babaçu apresentaram maior vida de fadiga para maiores amplitudes de deformação.
- (10) A adaptação no cálculo do FFL mostrou que ligantes mais rígidos têm maior FFL em baixos níveis de tensão e menor em altos níveis, enquanto ligantes rejuvenescidos apresentaram o comportamento inverso.
- (11) A presença de ácidos graxos no óleo, como o ácido láurico e oleico, favorece a formação de grupos funcionais que melhoram a interação com os compostos asfálticos, atenuando o endurecimento do ligante e prolongando sua vida útil, especialmente em ligantes expostos a processos de envelhecimento oxidativo.
- (12) O óleo atua como um agente rejuvenescedor, diminuindo a rigidez e restaurando as propriedades reológicas dos ligantes recuperados, o que foi evidenciado pela redução da intensidade das bandas características de sulfóxido ($S=O$) e carbonila ($C=O$) nos espectros FTIR. Esse comportamento demonstra a eficácia do óleo de babaçu em melhorar a coesão e flexibilidade do RA, tornando-o mais adequado para reutilização em misturas asfálticas de alto teor de RAP.

CAPÍTULO 4

4. AVALIAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS COM ÓLEO DE BABAÇU

Neste capítulo serão detalhados os materiais utilizados na composição das misturas asfálticas recicladas, o processo de dosagem empregado, os ensaios de desempenho mecânico realizados, o método de dimensionamento implementado para a obtenção das espessuras da camada de revestimento asfáltico por composição de mistura reciclada e os resultados obtidos nesta etapa. Este estudo visou fornecer uma compreensão abrangente dos procedimentos adotados, enfatizando a aplicação prática e os resultados obtidos a partir da utilização de misturas asfálticas recicladas como alternativa sustentável e tecnicamente viável para obras rodoviárias. A Figura 23 ilustra a sequência de atividades desenvolvidas nesta pesquisa.



Figura 23 - Resumo gráfico da avaliação das misturas asfálticas recicladas.

Os ensaios de caracterização mecânica dos corpos de prova das misturas asfálticas foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), seguindo as normas da American Society for Testing and Materials (ASTM), da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). A preparação dos corpos de prova foi realizada de acordo com a metodologia SUPERPAVE, utilizando o método de compactação por amassamento.

4.1. MATERIAIS

4.1.1. LIGANTE ASFÁLTICO VIRGEM E AGENTE REJUVENESCEDOR

O ligante asfáltico selecionado para este estudo possui penetração de 50/70 e temperatura máxima de PG de 64°C, escolhido por sua ampla aplicação na região Nordeste do Brasil, onde a pesquisa é conduzida. A caracterização deste ligante foi detalhada na seção 3.1.1. O óleo de babaçu, utilizado como agente rejuvenescedor, teve sua eficácia confirmada no capítulo 3, e sua caracterização é apresentada na seção 3.1.2.

4.1.2. AGREGADOS VIRGENS

Os agregados graníticos empregados na produção das misturas asfálticas compreenderam britas de tamanho nominal de 19 mm e 12,5 mm, acompanhadas de pó de pedra e areia como agregado miúdo. A escolha destes materiais fundamenta-se na composição característica das misturas asfálticas produzidas em usinas gravimétricas no Brasil, que integram britadeiras de agregados naturais graníticos diretamente em suas instalações, conforme discutido por Mascarenhas *et al.* (2023). A inclusão de cal hidratada como fíler tem por objetivo otimizar a adesividade do ligante asfáltico aos agregados, conforme ressaltado por Carvalho *et al.* (2023).

A Figura 24 ilustra a distribuição do tamanho dos grãos e a Tabela 15 apresenta a caracterização física dos agregados graníticos. A avaliação dos agregados naturais foi conduzida por meio dos procedimentos de massa específica, absorção, índice de forma, equivalente de areia, abrasão Los Angeles, análise granulométrica, partículas alongadas e achatadas e presença de partículas fraturadas e angularidade.

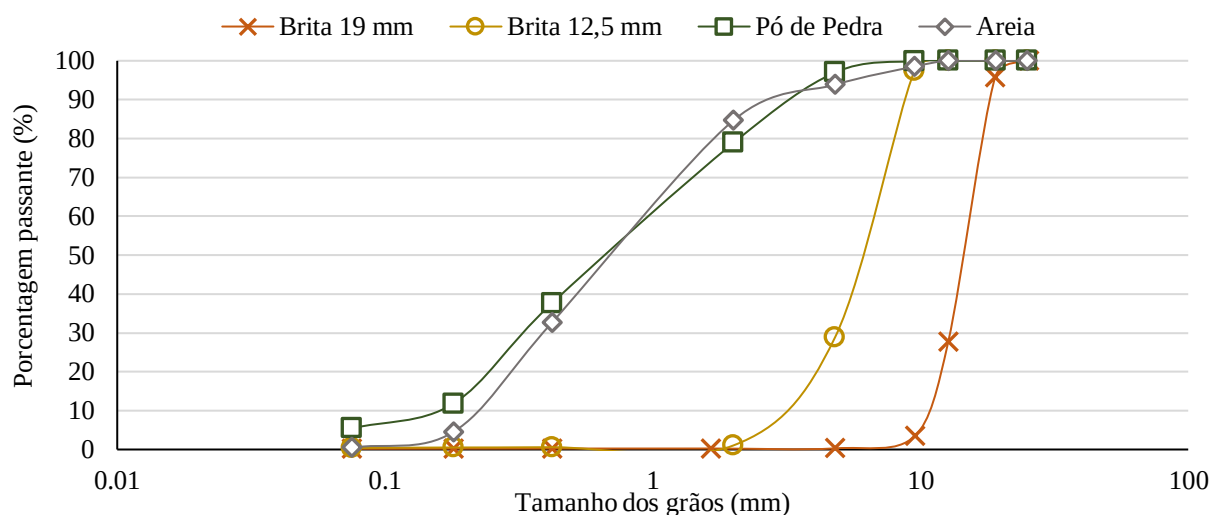


Figura 24 - Curvas de distribuição dos tamanhos dos grãos dos agregados virgens.

Tabela 15 - Caracterização física dos agregados.

Ensaio	Norma	Especificação	Resultados			
			Brita 19 mm	Brita 12,5 mm	Pó de pedra	Areia
Massa específica real (g/cm³)	(ASTM C 127, 2016)	NA	2,759	2,625	2,542	2,665
Massa específica aparente (g/cm³)	(ASTM C 127, 2016)	NA	2,732	2,612	2,43	2,607
Absorção (%)	(ASTM C 127, 2016)	≤2	0,36	0,52	0,66	0,835
Índice de Forma	(ASTM D 4791, 2019)	≥0,5	0,678	0,665	NA	NA
Equivalente Areia (%)	(ASTM D2419, 2014)	≥55	NA	NA	73,53	76,26
Abrasão “Los Angeles” (%)	(ASTM C131, 2020)	≤55	20,22	21,66	NA	NA
Partículas alongadas e achatadas (%)	(ASTM D 4791, 2019)	≤10	8,44	8,74	NA	NA
Partículas fraturadas (%)	(ASTM D 5821, 2017)	≥90	99,78	99,81	NA	NA
Angularidade (%)	(ASTM C 1252, 2017)	≥45	NA	NA	45,04	55,35

Nota: NA: não aplicável.

Todos os parâmetros analisados encontram-se dentro dos limites estabelecidos na coluna de especificações da Tabela 15. Quanto à distribuição granulométrica dos grãos, observa-se que os agregados graúdos exibem uma graduação uniforme, enquanto o pó de pedra e a areia apresentam uma graduação densa. Estes resultados estão em concordância com os obtidos em estudos anteriores de Cruz *et al.* (2022), Melo Neto *et al.* (2022, 2023a) e Costa *et al.* (2023a), que empregaram os mesmos tipos de agregados na composição de misturas asfálticas.

4.1.4. RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP)

O RAP utilizado neste estudo corresponde ao RAP1, conforme descrito no Capítulo 3, sendo escolhido devido à sua semelhança reológica com o RAP2. Essa característica permite inferir que os efeitos do óleo de babaçu em misturas asfálticas recicladas seriam comparáveis para ambos os materiais. A origem e caracterização do RAP foram realizadas de forma análoga à seção 3.1.3. A Tabela 16 e a Figura 25 mostram a caracterização física e a distribuição granulométrica dos agregados RAP antes e após o processo de extração do ligante envelhecido, com valores de caracterização dentro dos limites estabelecidos em norma para agregados virgens e curvas de distribuição do tamanho dos grãos indicando uma distribuição uniforme, corroborando estudos prévios que utilizaram RAP da mesma região (Carvalho *et al.*, 2024; da Costa *et al.*, 2024).

Tabela 16 - Resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados RAP.

Ensaio	Norma	Especificação	Resultados	
			Black RAP	White RAP
Massa específica real (g/cm ³)	(ASTM C 127, 2016)	NA	2,464	2,466
Massa específica aparente (g/cm ³)	(ASTM C 127, 2016)	NA	2,374	2,378
Absorção (%)	(ASTM C 127, 2016)	≤2	0,50	0,89
Equivalente Areia (%)	(ASTM D2419, 2014)	≥55	86,59	68,56
Partículas alongadas e achatadas (%)	(ASTM D 4791, 2019)	≤10	NA	9,34
Angularidade (%)	(ASTM C 1252, 2017)	≥45	52,62	45,43

Nota: NA: não aplicável.

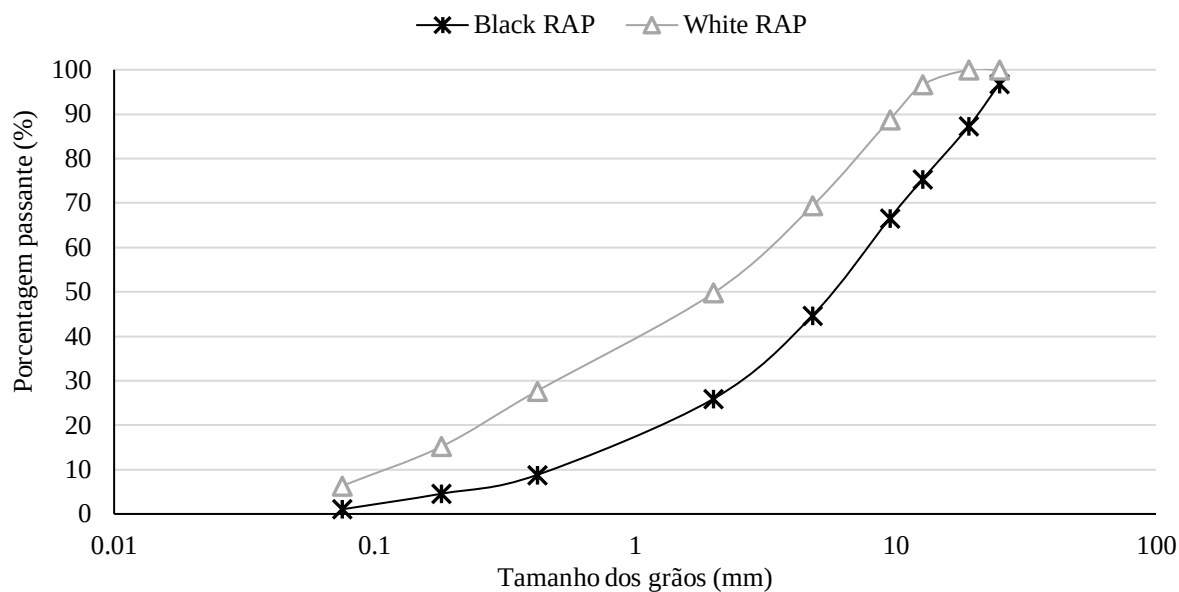


Figura 25 - Curvas granulométricas do RAP.

4.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.2.1. PROCESSO DE DOSAGEM DAS MISTURAS

A dosagem das misturas asfálticas de controle e recicladas foi conduzida de acordo com a metodologia SUPERPAVE, conforme normatizado pela ASTM D6925 (2015). O nível de tráfego considerado foi classificado como médio a alto, e o tamanho máximo nominal (TMN) de 19.0 mm. O processo de dosagem para a mistura asfáltica de controle ocorreu em três fases:

- (i) Consistiu na seleção de três composições granulométricas distintas, determinadas pela combinação ponderada das granulometrias dos agregados em uma granulometria única. A determinação das proporções dos agregados foi realizada para ajustar as granulometrias das misturas de acordo com os requisitos da metodologia SUPERPAVE, e para enquadrá-las nos limites definidos para a faixa C, conforme estabelecido pelo DNIT 031 (2006). As proporções finais dos agregados selecionados para cada uma das três composições estudadas são apresentadas na Tabela 17. As três granulometrias das misturas dos agregados foram denominadas "curva inferior", "curva intermediária" e "curva superior".

Essas granulometrias estão representadas graficamente na Figura 26, juntamente com a Faixa C do DNIT para misturas asfálticas.

Tabela 17 - Proporções de agregados para a mistura asfáltica de controle.

Faixa granulométrica	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

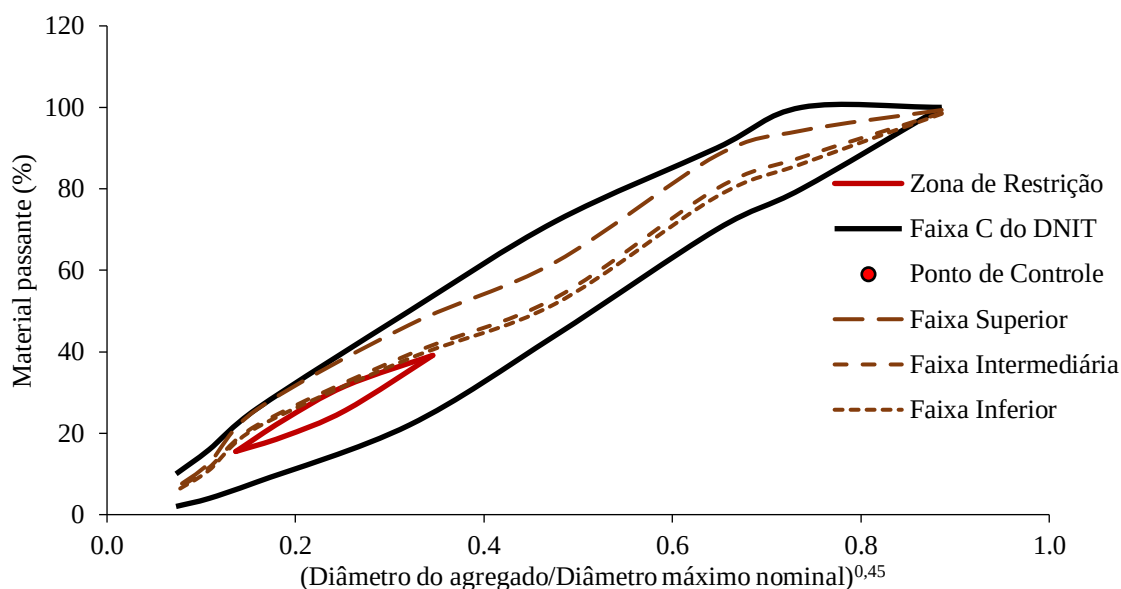


Figura 26 – Faixas granulométricas inferior, intermediária e superior.

- (ii) Após a obtenção das três composições granulométricas adequadas aos requisitos da metodologia, o processo avançou para a compactação de corpos de prova (CPs) com um teor de ligante inicial fixado em 5% do peso total da mistura asfáltica para as três composições em estudo. Os CPs foram compactados no Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS), seguindo as diretrizes da norma ASTM D6925 (2015). Nessa fase, foram moldados dois CPs para cada curva e para cada um dos três esforços de compactação (número de giros) distintos: N_{inicial} , N_{projeto} e $N_{\text{máximo}}$. Para o nível de tráfego médio a alto, esses esforços correspondem a 8 giros, 100 giros e 160 giros, respectivamente. O N_{projeto} foi empregado para a escolha do teor de ligante de projeto, enquanto o N_{inicial} e $N_{\text{máximo}}$ foram utilizados para avaliar a eficácia da compactação da

mistura. A Tabela 18 apresenta os parâmetros calculados para as três composições granulométricas avaliadas, além das especificações de acordo com os critérios do SUPERPAVE.

Tabela 18 - Parâmetros volumétricos das misturas com teor de ligante inicial.

Faixa granulométrica	Teor de ligante (%)	%Gmm @Ninicial	%Gmm @Nprojeto	%Gmm @Nmáximo	VAM (%)	Vv (%)
Inferior	5,00	92,00	97,40	98,10	14,95	2,75
Intermediária	5,00	89,10	97,17	97,80	15,43	3,72
Superior	5,00	88,80	96,30	96,90	15,62	4,30
Critérios SUPERPAVE	NA	<89,00	96,00	<98,00	≥13,00	4,00

Nota: Gmm: massa específica da mistura asfáltica solta, NA: não aplicável, VAM: volume de agregado mineral, Vv: volume de vazios.

A partir desses resultados, concluiu-se que a composição intermediária atendeu às exigências da dosagem e apresentou um volume de vazios (Vv) próximo de 4%. Assim, decidiu-se utilizar essa composição para determinar o teor de ligante asfáltico de projeto.

(iii) Após a determinação da curva a ser utilizada para a produção das misturas asfálticas, o procedimento de teste dos teores de ligante foi conduzido para definir o teor de projeto conforme os critérios SUPERPAVE. Em seguida, identificou-se o teor de ligante que apresentou parâmetros volumétricos dentro dos limites estabelecidos. Dois corpos de prova para cada teor (4,25%, 4,75%, 5,00%, 5,25% e 5,75%) foram compactados para verificar qual desses teores atendia aos critérios especificados. A Tabela 19 apresenta os parâmetros volumétricos para os teores de ligante testados, incluindo os resultados da Razão Betume/Vazios (RBV). Conforme os dados apresentados, o teor de projeto escolhido foi de 4,75% de ligante asfáltico para a mistura asfáltica de controle.

Tabela 19 - Parâmetros volumétricos da mistura asfáltica de controle para os teores de ligante testados.

Teor de ligante (%)	Gmm (g/cm ³)	%Gmm @Nprojeto	VAM (%)	Vv (%)	RBV (%)
4,25	2,50	92,13	18,68	5,87	77,66
4,75	2,48	96,95	15,47	4,05	74,46
5,00	2,46	97,17	15,43	3,72	74,47
5,25	2,45	97,69	15,38	2,31	74,54
5,75	2,44	97,91	15,65	2,09	75,05
Critérios SUPERPAVE	NA	96,00	≥13,00	4,00	65 a 75

Nota: Gmm: massa específica da mistura asfáltica solta, NA: não aplicável, RBV: razão betume/vazios, VAM: volume de agregado mineral, Vv: volume de vazios.

A dosagem das misturas asfálticas recicladas seguiu um processo semelhante ao da mistura asfáltica de controle. Os dados da caracterização do ligante asfáltico foram utilizados para determinar o teor ideal de RAP a ser incorporado na dosagem da mistura asfáltica reciclada, aplicando o método Blending Chart (método B) do NCHRP Report 452 (2001). Esse método envolve o conhecimento do PG contínuo do ligante asfáltico virgem e do PG do ligante asfáltico recuperado para determinar o teor de RAP a ser utilizado. Com base no gráfico da Figura 9 (a), os teores de RAP foram estabelecidos em 56% para a adição de 3% de óleo de babaçu (BO), 63% para a adição de 5% BO e 70% para a adição de 7% BO, considerando uma temperatura de PG contínuo final estimada em 70°C. A determinação desses teores de óleo foi baseada na obtenção de teores de RAP superiores a 50%, com o objetivo de avaliar misturas asfálticas compostas majoritariamente por RAP. A escolha da temperatura de 70°C como PG contínuo final deve-se ao aumento das temperaturas na região Nordeste nos últimos anos. Dessa forma, é necessário o uso de um ligante mais resistente à deformação permanente nas elevadas temperaturas do verão.

Além disso, considerou-se o uso de 15% de RAP na composição da mistura asfáltica reciclada sem aditivos modificadores, visto que essa proporção é comumente adotada em usinas asfálticas no Brasil e serve como critério de comparação com as misturas recicladas modificadas. A Tabela 20 apresenta as porcentagens dos agregados que se enquadraram na curva intermediária da mistura, uma vez que a mistura de controle foi dosada conforme essa curva e buscou-se que as misturas asfálticas recicladas apresentassem esqueleto pétreo semelhante à mistura de controle. A Figura 27 exhibe as curvas das composições das misturas recicladas para cada teor de RAP utilizado, todas dentro da faixa C do DNIT.

Tabela 20 - Proporções de agregados das misturas asfálticas recicladas para cada teor de RAP adicionado.

Misturas recicladas	Brita 19,0 mm	Brita 12,5 mm	Pó de Pedra	Areia	Cal	RAP
15%RAP (0%BO) (%)	15	17	50	0	3	15
56%RAP (3%BO) (%)	10	16	15	0	3	56
63%RAP (5%BO) (%)	12	12	10	0	3	63
70%RAP (7%BO) (%)	13	14	0	0	3	70

Nota: BO: óleo de babaçu, RAP: *reclaimed asphalt pavement*.

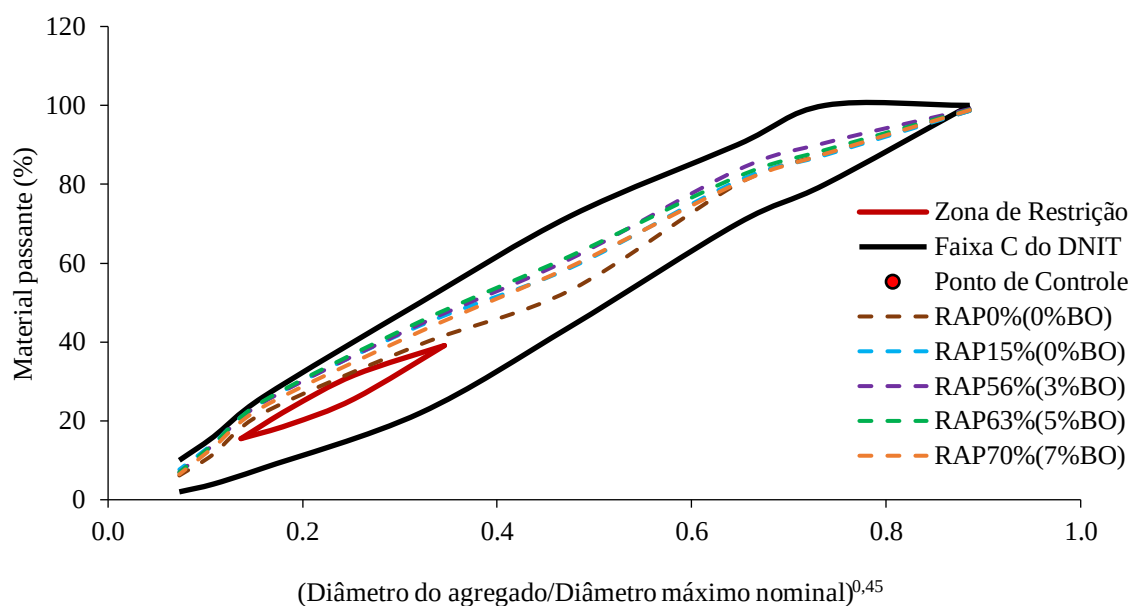


Figura 27 - Faixas granulométricas das misturas asfálticas recicladas.

Optou-se por não utilizar o agregado miúdo tipo areia na composição das misturas recicladas devido à adição do RAP, buscando otimizar o *layout* da usina asfáltica ao substituir o uso do silo da areia pelo agregado RAP. O teor de ligante asfáltico virgem de projeto foi testado para cada composição de mistura asfáltica reciclada, determinando-se um único teor de ligante que atendesse aos parâmetros volumétricos para todas as misturas recicladas modificadas com óleo de babaçu. Isso visou manter uma variável constante (teor de ligante de projeto) para verificar a influência do teor de óleo presente no ligante nas características mecânicas das misturas recicladas, especialmente quanto à rigidez, que afeta o desempenho em relação à fadiga e à deformação permanente.

Todas as misturas asfálticas recicladas foram avaliadas com pelo menos três teores de ligante asfáltico para verificar se os parâmetros volumétricos atendiam aos limites especificados pela dosagem SUPERPAVE. O objetivo foi identificar o teor de ligante asfáltico que satisfizesse, ou estivesse mais próximo possível, dos valores limites especificados para cada parâmetro. Os teores foram determinados com base na premissa de que pelo menos 70% do ligante RAP se desprenderia no momento da mistura, facilitando a previsão da quantidade de ligante virgem necessária no processo de dosagem.

Dentre os teores de ligante asfáltico avaliados para todas as misturas asfálticas recicladas, definiu-se o teor de projeto de 3,5% para aquelas modificadas com óleo de babaçu

(56%, 63% e 70% de RAP), enquanto a mistura reciclada com 15% de RAP, sem adição de óleo de babaçu, apresentou teor de projeto de 4,5%. Durante o processo de usinagem, o RAP foi aquecido à mesma temperatura dos agregados virgens, promovendo a ativação e liberação parcial do ligante envelhecido presente no RAP, o que possibilitou a redução do consumo de ligante virgem em todas as composições recicladas. Essa redução foi mais expressiva nas misturas contendo óleo de babaçu e altos teores de RAP, resultando em uma economia de até 1,25% no uso de ligante virgem em comparação à mistura de controle. Por outro lado, a mistura com 15% de RAP apresentou uma redução menor, de apenas 0,25%, atribuída à disponibilidade inferior de ligante proveniente do RAP e à ausência de agente rejuvenescedor.

Costa *et al.* (2023a) determinaram um teor de projeto de ligante PEN 50/70 para misturas asfálticas recicladas com 25%, 50%, 75% e 100% de RAP de 5,5%, superior ao teor obtido nesta pesquisa de 3,5%, indicando que o uso do óleo de babaçu como modificador do ligante asfáltico permitiu reduzir o consumo de ligante na produção das misturas recicladas com altos teores de RAP.

A Tabela 21 apresenta os parâmetros volumétricos e as temperaturas de mistura e compactação obtidas no ensaio de viscosidade rotacional para cada tipo de ligante asfáltico utilizado. Vale ressaltar que as temperaturas do ligante asfáltico com óleo de babaçu diminuíram à medida que mais óleo foi adicionado, caracterizando misturas asfálticas mornas com redução nas temperaturas de trabalho de até 13°C com o uso de 7% de óleo de babaçu (BO). As temperaturas de mistura dos agregados foram determinadas como a temperatura de mistura do ligante asfáltico obtida acrescida de 10°C.

Tabela 21 - Parâmetros volumétricos das misturas asfálticas recicladas.

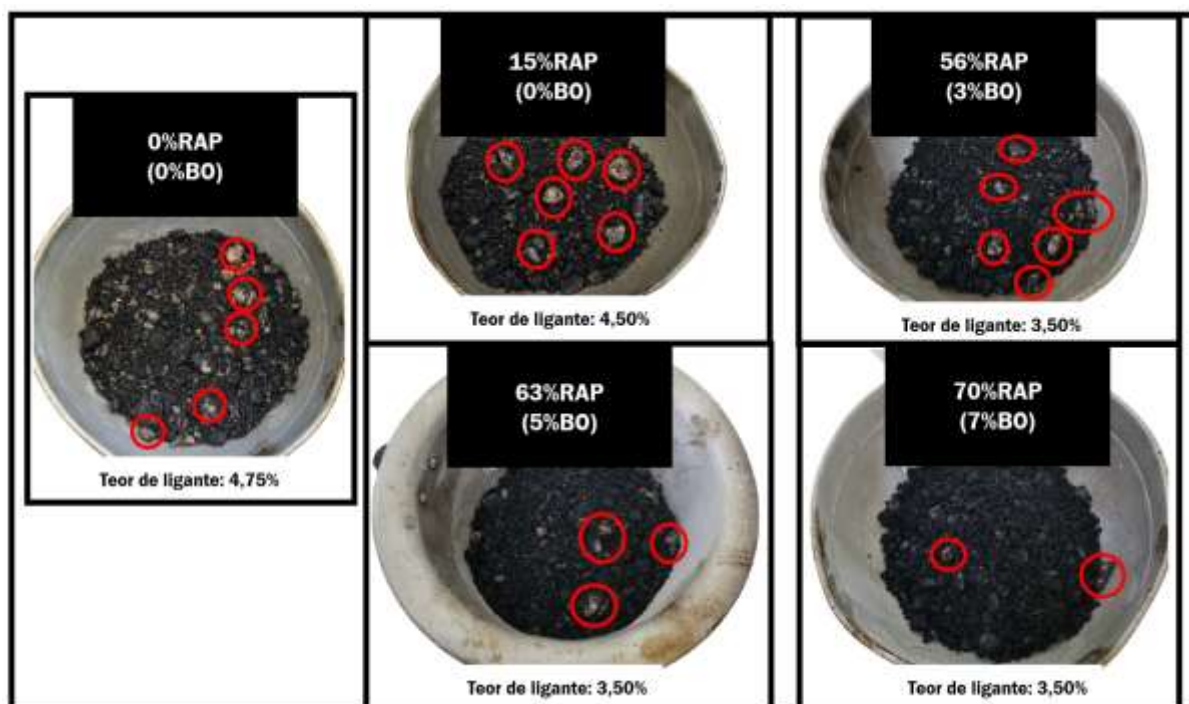
Mistura reciclada	% Ligante	Gmm (g/cm ³)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	%Gmm @Nprojeto	T (°C) de mistura ligante/agregado	T (°C) de compactação
15%RAP (0%BO)	4,50	2,46	4,12	14,52	71,62	95,88	153/163	144
	4,00	2,44	4,69	14,95	68,63	95,31		
	3,50	2,45	5,08	15,34	66,89	94,92		
56%RAP (3%BO)	3,50	2,42	3,90	11,88	67,16	96,10	149/159	139
	3,00	2,44	4,58	12,56	63,51	95,42		
	2,50	2,45	5,27	13,25	60,23	94,73		
63%RAP (5%BO)	3,50	2,42	3,94	11,92	66,93	96,06	145/155	136
	3,00	2,44	4,63	11,47	59,65	95,37		
	2,50	2,46	5,31	11,01	51,77	94,69		
70%RAP (7%BO)	3,50	2,42	4,08	12,06	66,15	95,92	140/150	130
	3,00	2,44	4,77	11,61	58,93	95,23		
	2,50	2,46	5,45	11,15	51,11	94,55		
	2,00	2,48	6,14	10,70	42,63	93,86		

Nota: Gmm: massa específica da mistura asfáltica solta, RBV: razão betume/vazios, T (°C): temperatura em graus celsius, VAM: volume de agregado mineral, Vv: volume de vazios.

As misturas asfálticas recicladas com adição de agente rejuvenescedor foram usadas a temperaturas inferiores à da mistura de controle. No entanto, a redução de temperatura proporcionada pela incorporação do óleo de babaçu ao ligante virgem não comprometeu a eficiência do processo de mistura; ao contrário, observou-se melhora na trabalhabilidade, especialmente na formulação contendo 70% de RAP e 7% de óleo de babaçu, que apresentou desempenho superior em termos de homogeneização.

Tal comportamento pode ser atribuído à maior disponibilidade de ligante envelhecido nos teores elevados de RAP, cuja ativação, combinada ao efeito amaciante do óleo de babaçu, tende a aumentar o ligante efetivo total da mistura, podendo até superar o teor da mistura convencional. A Figura 28(a) apresenta amostras das misturas após o processo de usinagem. Para verificar se a adição do óleo de babaçu comprometeria a adesividade do ligante asfáltico aos agregados, foi realizado o ensaio de adesividade conforme a norma DNIT 078 (1994), conforme ilustrado na Figura 28(b).

(a)



(b)

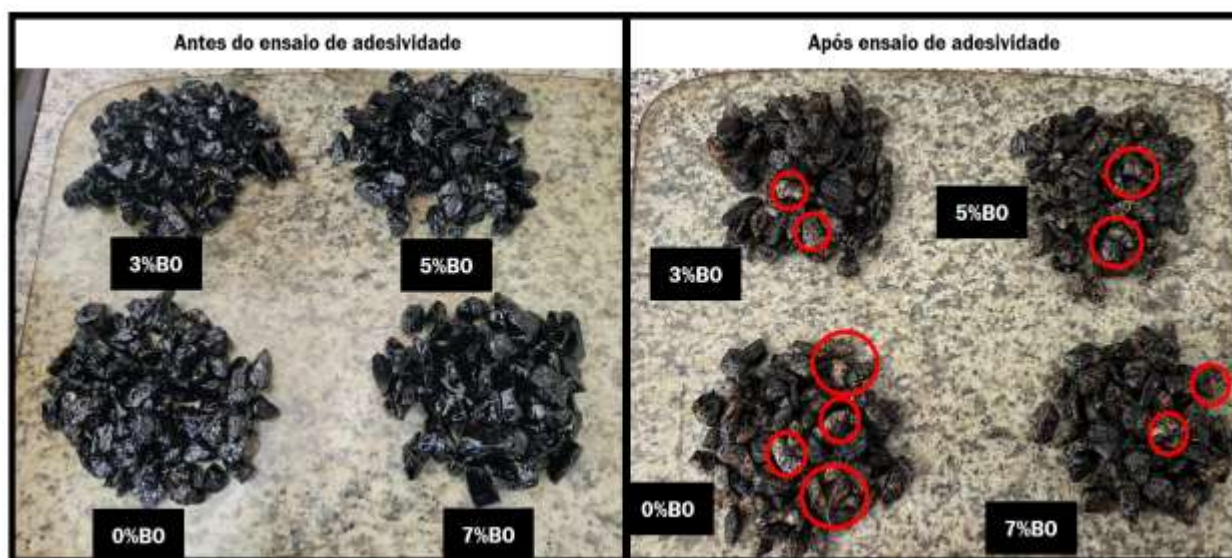


Figura 28 - Amostras das misturas asfálticas: (a) misturas soltas, (b) agregados graúdos no ensaio de adesividade.

Conforme verificado na Figura 28 (b), nenhum dos ligantes analisados — puro e modificados com 3%, 5% e 7% de óleo de babaçu — apresentou desempenho satisfatório no ensaio de adesividade, tendo em vista que todas as amostras apresentaram desprendimento parcial da película ao término do teste. Esse comportamento era previsível, uma vez que os agregados graníticos empregados são considerados ácidos, com teor de sílica superior a 65%. Ainda assim, observa-se que o desprendimento foi ligeiramente mais pronunciado na amostra com ligante puro, quando comparado às formulações modificadas.

Com base em estudos prévios que utilizaram agregados graníticos da mesma fonte (de Medeiros Melo Neto *et al.*, 2022, 2023b; Minervina Silva *et al.*, 2024), optou-se por não empregar o melhorador de adesividade Dope. Essa decisão fundamenta-se no fato de que as misturas asfálticas investigadas nesses trabalhos incorporaram cal como filer e apresentaram resistência retida à tração indireta superior ao limite mínimo de 80% estabelecido pelo SUPERPAVE. Os autores destacam que a adição de cal como filer em teores $\geq 2\%$ atenua a acidez do agregado granítico, favorecendo a adesividade das misturas.

4.2.2. ANÁLISE DE DESEMPENHO MECÂNICO

O RAP é um material heterogêneo, o que impede a garantia de uma volumetria exata, pois o tamanho dos agregados pode variar entre os corpos de prova. Portanto, após a compactação para a realização dos ensaios mecânicos, os corpos de prova devem apresentar alturas dentro de uma margem de variação de ± 1 cm, a fim de manter uma maior representatividade dos resultados obtidos e um volume de vazios dentro da faixa de $4\% \pm 0,5\%$.

As misturas asfálticas de controle e recicladas foram submetidas a ensaios de desempenho mecânico convencionais, visando avaliar seu comportamento técnico em diversos aspectos, como rigidez, resiliência, fadiga, deformação plástica, umidade e desgaste abrasivo. Esses testes foram realizados em condições mecânicas padronizadas de temperatura e tensão, conforme especificado pelas normas aplicáveis.

4.2.2.1. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA (RTI)

A norma DNIT 136 (2018) é utilizada para o teste de resistência à tração indireta (RTI) das misturas asfálticas. Neste ensaio, duas forças diametralmente opostas são aplicadas a um corpo de prova cilíndrico por meio de frisos metálicos, gerando tensões de tração uniformes perpendicularmente ao seu diâmetro. O carregamento estático crescente é aplicado por meio de uma prensa mecânica, com uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s. A leitura da carga de ruptura é realizada por um anel dinamométrico acoplado à prensa. Utilizou-se uma amostragem em triplicata para cada composição de mistura asfáltica, sendo o valor médio dos corpos de prova (CPs) considerado como o resultado do ensaio.

Os corpos de prova destinados ao ensaio apresentam alturas de aproximadamente 65 mm e diâmetros de 100 ± 2 mm, com cerca de 4% de volume de vazios. Esses corpos de prova são ensaiados em um dispositivo centralizador adaptado do suporte tipo Lobo Carneiro e submetidos à prensa mecânica. Com o valor da carga de ruptura (P) obtido, a resistência à tração indireta (RTI) é calculada utilizando a Equação 4.

$$RTI = \frac{2 P}{100 \pi D H} \quad (4)$$

Onde:

- RTI = Resistência à tração indireta, em MPa;
- P = Carga de ruptura, em N;
- D = Diâmetro do corpo de prova, em mm;
- H = Altura do corpo de prova, em mm.

4.2.2.2. DANO POR UMIDADE INDUZIDA (LOTTMAN - RRTI)

O ensaio de dano por umidade induzida mede a adesividade, considerando o efeito deletério da água sobre as propriedades de resistência mecânica da mistura asfáltica. O método de ensaio DNIT 180 (2018) avalia o potencial de deslocamento da película de ligante asfáltico em misturas asfálticas sob a ação da água em ciclos de gelo e degelo.

Seis corpos de prova de cada grupo de mistura asfáltica foram moldados no Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS), com 100 mm de diâmetro e aproximadamente 67 mm de altura. A norma DNIT 180 (2018) exige que os corpos de prova apresentem volume de vazios de $7 \pm 0,5\%$ para este ensaio. Para alcançar esse volume de vazios, os corpos de prova foram compactados com apenas 30 giros, em vez dos 100 giros de projeto. Os corpos de prova foram divididos em dois grupos de três amostras cada. O primeiro grupo passou por um processo de condicionamento com ciclos de gelo e degelo, enquanto o segundo grupo não foi condicionado. Ambos foram submetidos ao ensaio de resistência à tração indireta. A resistência à tração indireta do grupo condicionado foi denominada “RTI_C”, enquanto a do grupo não condicionado foi denominada “RTI_{NC}”. O resultado deste ensaio é expresso pela Resistência Retida à Tração Indireta (RRTI), calculada conforme a Equação 5.

$$RRTI (\%) = \frac{RTI_C}{RTI_{NC}} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

- RTI_C = Resistência à tração indireta das amostras condicionadas, em MPa;
- RTI_{NC} = Resistência à tração indireta das amostras não-condicionadas, em MPa.

4.2.2.3. MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

A rigidez das misturas asfálticas foi medida pelo módulo de resiliência, utilizando a configuração do ensaio de compressão diametral sob carga repetida, de acordo com a norma DNIT 135 (2018). Corpos de prova cilíndricos foram moldados no Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS), com 100 mm de diâmetro e aproximadamente 65 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 foi de 1 Hz, com um ciclo composto por 0,1 s de aplicação da carga seguido de 0,9 s de repouso.

A carga aplicada gerou uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação, resultando em um deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada. Para medir o deslocamento horizontal dos corpos de prova foram utilizados dois transdutores mecânicos-eletromagnéticos tipo LVDT (*Transdutor Linear de Variação Diferencial*), presos ao corpo de prova por alças de referência. Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente de 25 °C, utilizando-se no mínimo três amostras de cada grupo de mistura asfáltica analisado. O resultado deste ensaio foi expresso pela Módulo de Resiliência (MR), calculado utilizando a Equação 6.

$$MR = \frac{P}{|\Delta H|t} (0,2692 + 0,9976\mu) \quad (6)$$

Onde:

- MR = Módulo de Resiliência da mistura asfáltica, em MPa;
- P = Carga cíclica, em N;
- ΔH = Deslocamento horizontal (elástico ou resiliente), na interseção das duas tangentes, em mm;
- t = Altura do corpo de prova, em mm.

4.2.2.4. RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE (*FLOW NUMBER* - FN)

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 foram utilizados corpos de prova cilíndricos, com três amostras de cada grupo, apresentando altura de aproximadamente 150 mm e 100 mm de diâmetro, moldados no Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS), com 7% de volume de vazios.

Antes do ensaio, os corpos de prova foram aquecidos em estufa a 60 °C durante 3 horas e 30 minutos. O procedimento foi realizado utilizando a *Asphalt Mixture Performance Tester* (AMPT) da marca IPC Global®. O carregamento do ensaio foi realizado em duas etapas: pré-carregamento e carregamento cíclico. No pré-carregamento, aplicou-se uma carga de compressão de $10,2 \pm 0,5$ kPa (carga de contato) por 60 segundos. Após o pré-carregamento, foi aplicado o carregamento cíclico de compressão, com duração de 1 segundo. No carregamento uniaxial cíclico compressivo, aplicou-se uma carga de $204,0 \pm 4,0$ 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 (aproximadamente 2 horas de ensaio) ou uma deformação de 50.000 *microstrains*, ponto em que as amostras invariavelmente já atingiram a ruptura.

4.2.2.5. FADIGA POR TRAÇÃO INDIRETA (FTI)

A escolha desse tipo de ensaio para estimar a vida de fadiga para diferentes níveis de tensão das misturas asfálticas foi devido à sua aplicabilidade no dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil. O *software* MeDiNa utiliza dados obtidos nesse ensaio após construção dos gráficos de número de ciclos (N_f) versus deformação resiliente inicial (ε_i).

A vida de fadiga foi analisada por meio do método de ensaio DNIT 183 (2018) . Assim como no ensaio de módulo de resiliência, corpos de prova cilíndricos compactados no CGS (100 mm de diâmetro e aproximadamente 65 mm de altura) são submetidos à compressão diametral, gerando um estado biaxial de tensão de tração perpendicular à direção da carga aplicada. A aplicação da carga foi realizada utilizando a UTM-25, na forma de

pulsos de carregamento *haversine* com frequência de 1 Hz, consistindo em 0,1 s de aplicação seguido de 0,9 s de descanso. Durante o ensaio, a deformação devido à tração aumenta até provocar a ruptura do corpo de prova ao longo da parte central do plano diametral vertical.

A deformação dos corpos de prova foi medida por meio do sensor de deslocamento do atuador da UTM. Como critério de parada do ensaio, definiu-se o deslocamento final do atuador de 8 mm, garantindo a ruptura completa dos corpos de prova. Para avaliar a vida de fadiga da mistura, registrou-se o número de ciclos de carregamento (N_f) que provocou a ruptura do corpo de prova em cada nível de tensão. O ensaio foi realizado com quatro cargas diferentes, gerando quatro níveis de tensão cujos valores variaram entre 40% e 55% da resistência à tração indireta da mistura asfáltica.

Para cada nível de tensão, foram ensaiados três corpos de prova. Os ensaios de fadiga são geralmente interpretados por meio de curvas que relacionam os níveis de tensão aplicados com o número de ciclos (N_f) das amostras, ajustadas por uma função exponencial, conhecida como lei ou modelo de fadiga, também chamadas de curvas de *Wöhler*. Após determinar os valores de N_f das amostras, foram plotadas 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, foi ajustada uma linha de tendência aos dados de cada mistura, seguindo o modelo de previsão de fadiga de *Wöhler* (Equação 7 e Equação 8). De acordo com a norma do DNIT 183 (2018), essas regressões lineares devem apresentar um R^2 mínimo de 0,8.

$$N_f = k_2 \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{n_2} \quad (7)$$

$$N_f = k_3 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_3} \quad (8)$$

Onde:

- N_f = número de ciclos de carregamento que leva a amostra à ruptura;
- ε_i = deformação resiliente inicial;
- $\Delta\sigma$ = diferença das tensões no centro do corpo de prova, em MPa;
- k_i e n_i = constantes obtidas na regressão linear dos pares N_f ;

4.2.2.6. DESGASTE CÂNTABRO (%D)

O ensaio Cântabro é comumente empregado para determinar a resistência à desagregação de misturas asfálticas, a qual pode ser atribuída a baixos teores de ligante asfáltico ou ao excesso de pó na composição das misturas asfálticas (de Moraes *et al.*, 2023). Essa desagregação resulta no arrancamento progressivo de agregados da camada de rolamento devido ao atrito entre pneu e pavimento, sendo uma patologia frequente em revestimentos no Brasil. Nesta pesquisa, que visa avaliar a influência do uso de altos teores de RAP e do óleo de babaçu como agente rejuvenescedor, obteve-se uma redução significativa no teor de ligante para essas misturas no processo de dosagem SUPERPAVE. Dessa forma, buscou-se avaliar suas suscetibilidades ao desgaste abrasivo.

O ensaio foi conduzido de acordo com a norma DNIT 383 (1999) e consistiu na avaliação da perda por desgaste das misturas utilizando o aparelho de abrasão Los Angeles. Os corpos de prova foram pesados inicialmente (M_i) e, em seguida, colocados individualmente no aparelho de abrasão Los Angeles sem carga abrasiva, onde foram submetidos a 300 revoluções a uma velocidade angular de 30 rpm. Após esta etapa, foram removidos do tambor e pesados novamente (M_f). O ensaio foi realizado em triplicata para cada composição de mistura asfáltica avaliada. O percentual de desgaste da mistura asfáltica (%D) foi calculado de acordo com a Equação 9:

$$(\%D) = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

- M_i = Massa inicial do corpo de prova, em g;
- M_f = Massa final do corpo de prova, em g;
- %D = Desgaste cântabro.

4.2.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística dos dados experimentais foi realizada em etapas, iniciando pela verificação da normalidade dos dados e culminando na aplicação de testes de significância estatística. A seguir, detalha-se cada uma dessas etapas.

Etapa 1 - Elaboração dos Gráficos de Probabilidade Normal: Para verificar se os dados obtidos em cada ensaio mecânico seguiam uma distribuição normal, foram elaborados Gráficos de Probabilidade Normal (ou “*Normal Probability Plots*”). Esse tipo de gráfico tem como objetivo verificar se um conjunto de dados está aproximadamente alinhado com uma distribuição normal (Chantarangsi *et al.*, 2015). Os procedimentos dessa etapa foram:

- (i) Organização dos dados: Inicialmente, os dados foram organizados em ordem crescente, sendo atribuída uma posição a cada observação.
- (ii) Cálculo da probabilidade acumulada: Para cada valor do conjunto de dados, foi calculada a probabilidade acumulada, que é a fração da amostra correspondente àquela posição específica no conjunto ordenado.
- (iii) Conversão para escores z: As probabilidades acumuladas foram convertidas em escores z, que representam a quantidade de desvios padrão que uma observação se encontra da média de uma distribuição normal.
- (iv) Construção do gráfico: Com os escores z no eixo Y e os valores observados no eixo X, o gráfico de probabilidade normal foi construído. Um bom ajuste dos dados a uma linha reta indica que o conjunto de dados segue uma distribuição normal.
- (v) Inserção da linha de tendência e cálculo do R^2 : Para quantificar o grau de ajuste dos dados à distribuição normal, foi inserida uma linha de tendência linear. O coeficiente de determinação (R^2) foi calculado para avaliar a aderência dos dados à reta. Valores de R^2 superiores a 0,70 foram considerados indicativos de uma distribuição aproximadamente normal.

Etapa 2 - Aplicação do Teste ANOVA de Fator Único: Após a verificação da normalidade dos dados, realizou-se o teste ANOVA (Análise de Variância) de fator único, com o objetivo de identificar se existiam diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos grupos analisados (Larson, 2008). O procedimento foi conduzido conforme os seguintes passos:

- (i) Definição do fator e das variáveis dependentes: O teste ANOVA foi aplicado considerando o fator único de interesse (tipo de mistura asfáltica), e as variáveis dependentes foram os resultados dos ensaios mecânicos.
- (ii) Cálculo das somas de quadrados: As somas de quadrados foram calculadas para determinar a variação entre e dentro dos grupos. Isso incluiu: Soma de quadrados (SQ) entre grupos (mede a variação entre as médias dos grupos) e dentro dos grupos (mede a variação dentro dos grupos individuais).
- (iii) Cálculo da estatística F: A estatística F foi calculada como a razão entre a variância entre os grupos e a variância dentro dos grupos, conforme Equação 10:

$$F = \frac{\text{variação entre médias da amostra}}{\text{variação dentro das amostras}} \quad (10)$$

- (iv) Comparação com a distribuição F: O valor de F calculado foi comparado com o valor crítico da distribuição $F_{\text{crítico}}$ para um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Caso o valor de F seja maior que o valor crítico ($F_{\text{crítico}}$), rejeita-se a hipótese nula de que as médias dos grupos sejam iguais, indicando a existência de diferenças estatisticamente significativas.

Etapa 3 - Aplicação do Teste de Tukey: Para identificar quais grupos apresentavam diferenças significativas entre si após a realização do teste ANOVA, foi aplicado o teste de comparações múltiplas de Tukey (McHugh, 2011). O procedimento foi realizado da seguinte forma:

- (i) Cálculo da diferença mínima significativa (DMS): A diferença mínima significativa entre as médias dos grupos foi calculada de acordo com a fórmula da Equação 11:

$$DMS = q \cdot \sqrt{\frac{SQ}{n}} \quad (11)$$

Onde:

- q = valor crítico da distribuição q de Tukey;
- SQ = variância dentro dos grupos;
- N = número de observações por grupo.

- (ii) Comparação das médias dos grupos: Cada par de médias foi comparado, e quando a diferença entre elas excedeu a DMS calculada, concluiu-se que as médias dos respectivos grupos eram significativamente diferentes entre si.
- (iii) Interpretação dos resultados: As comparações indicaram quais grupos apresentavam diferenças estatisticamente significativas, complementando a análise ANOVA e proporcionando uma melhor compreensão das variações entre os tratamentos testados.

4.2.4. INFLUÊNCIA DO USO DE RAP E ÓLEO DE BABAÇU NO DIMENSIONAMENTO DA CAMADA DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO

O método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos flexíveis envolve a coleta de dados sobre tráfego, condições ambientais e materiais estruturais do pavimento. Esses dados são correlacionados com a resistência dos materiais asfálticos das camadas do pavimento e informações de tráfego específicas, considerando tensões, deformações e danos resultantes da carga repetitiva.

Para aplicar o método, Franco e Motta (2020a) introduziram uma ferramenta chamada SisPav, projetada para calcular os estados de tensão nas estruturas e analisar o desempenho dos materiais. Essa ferramenta passou por várias iterações até chegar à sua versão mais recente, conhecida como Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos (MeDiNa) (Franco; Motta, 2020a). Por meio do uso dessa ferramenta é possível determinar as espessuras da camada de rolamento, base, sub-base e reforço do subleito, sendo essas camadas responsáveis pela distribuição das cargas impostas pelos veículos. A confiabilidade dos resultados em termos de espessuras das camadas do pavimento, vida útil e área de trincas é essencial, exigindo dados precisos sobre o tráfego e as propriedades do concreto asfáltico inseridos no software (Guabiroba *et al.*, 2023).

Com base nos resultados das propriedades mecânicas das misturas asfálticas recicladas obtidos neste estudo, os seguintes dados foram considerados para o dimensionamento dos pavimentos pelo *software*: período de projeto de 10 anos, taxa de crescimento médio anual em torno de 4% e número total de passagens do eixo padrão (N), a ser determinado de acordo com o processo de dosagem das misturas. Durante esta etapa, o subleito e as camadas de sub-

base e base permanecerão inalterados, enquanto os materiais das camadas asfálticas foram substituídos pelas misturas asfálticas recicladas avaliadas neste estudo. Posteriormente, foram realizadas duas análises: a primeira para determinar a espessura ideal da camada asfáltica necessária para atender aos critérios do MeDiNa; e a segunda, mantendo as espessuras das camadas subjacentes ao revestimento constantes, avaliando o desempenho de cada mistura em relação a trincas e afundamentos na trilha de rodas ao longo do período de projeto.

Fritzen *et al.* (2019) desenvolveram uma metodologia para classificar misturas asfálticas em quatro classes com base no desempenho à fadiga, onde uma classe superior indica um melhor comportamento da mistura. Essa classificação envolve o estabelecimento da curva de *Wholer*, relacionando o número de ciclos (N) à deformação inicial de tração (ϵ_i). Ao realizar a regressão dessa curva, o Fator de Fadiga da Mistura (FFM) pode ser determinado utilizando a Equação 10. Subsequentemente, foram estabelecidas correlações entre o módulo de resiliência e o FFM para determinar a classe específica de cada mistura. Essa metodologia, desenvolvida por Fritzen *et al.* (2019), é implementada no software MeDiNa. A Tabela 22 apresenta a regressão utilizada por Fritzen *et al.* (2019) na determinação das classes para um número padrão de repetições com 30% de área trincada (de acordo com o critério considerado no software MeDiNa).

$$FFM = 0.2 [\log(N_{100}) + \log(N_{250})] \quad (10)$$

Onde:

- FFM = Fator de Fadiga da Mistura;
- N_{100} = número de ciclos de carga para a deformação específica de 100 μ ;
- N_{250} = número de ciclos de carga para a deformação específica de 250 μ .

Tabela 22 - Relação entre FFM e módulo de resiliência para o número de repetições do eixo padrão para 30% de área trincada.

Classe de Fadiga	Intervalo do Número Padrão de Repetições por Eixo Padrão (N)	Regressão
0	$N \leq 4,5 \times 10^6$	NA
1	$4,5 \times 10^6 < N \leq 6,0 \times 10^6$	$FFM = 74,58 MR^{-0,526}$
2	$6,0 \times 10^6 < N \leq 7,5 \times 10^6$	$FFM = 31,31 MR^{-0,410}$
3	$7,5 \times 10^6 < N \leq 1,0 \times 10^7$	$FFM = 74,58 MR^{-0,316}$
4	$N > 1,0 \times 10^7$	$FFM = 74,58 MR^{-0,207}$

Nota: MR: módulo de resiliência, N: número total de passagens por eixo padrão, NA: não aplicável.

Fonte: Adaptado de Fritzen *et al.* (2019) e Guabiroba *et al.* (2023).

O processo de projeto MeDiNa foi dividido em quatro partes: determinação das camadas do pavimento, determinação das propriedades mecânicas, projeto mecanístico-empírico do pavimento e critérios de desempenho, espessura e vida útil. A Figura 29 ilustra o procedimento metodológico do projeto MeDiNa.

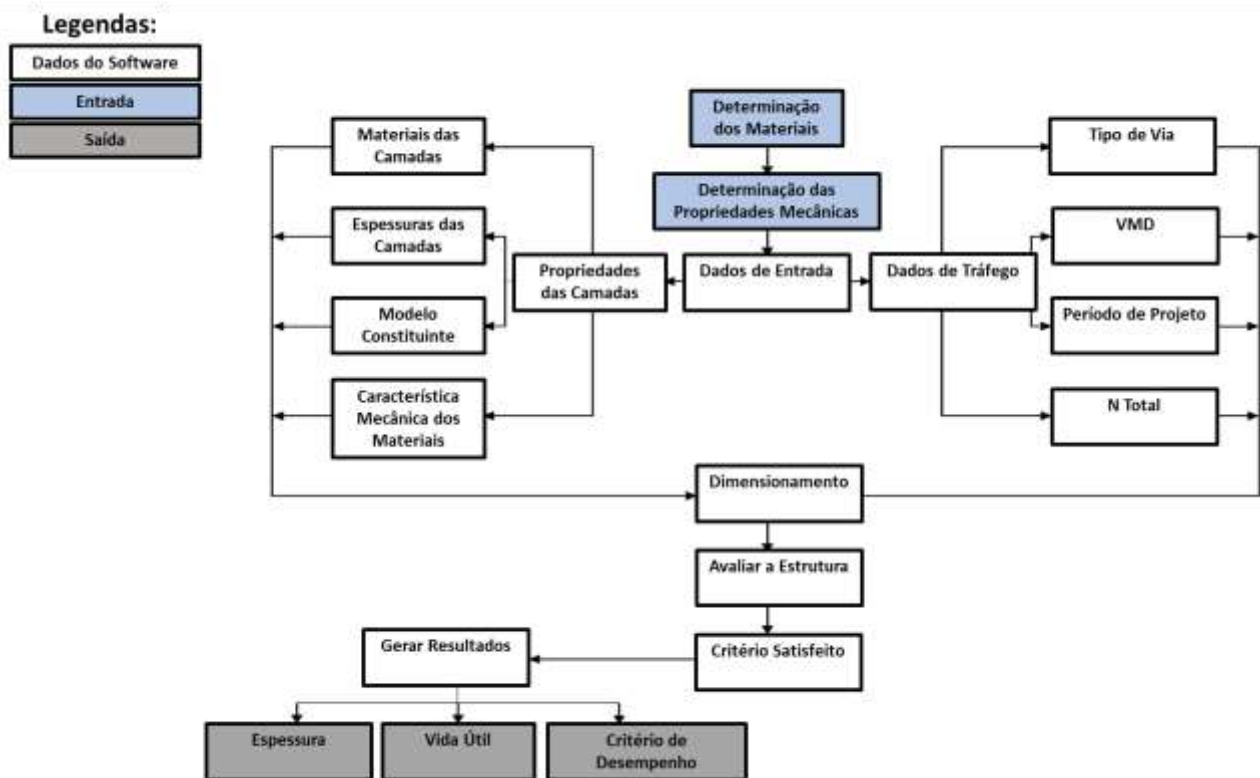


Figura 29 - Fluxograma do dimensionamento MeDiNa.

A variação das espessuras das misturas asfálticas recicladas, em função do desempenho mecânico em termos de módulo de resiliência, vida de fadiga e deformação permanente, influencia diretamente no custo das misturas asfálticas por quilômetro de rodovia. Isso se deve ao fato de que o custo por quilômetro de rodovia é determinado pelo volume de mistura asfáltica necessária, calculado pela multiplicação de 1 km pela largura da rodovia e pela espessura determinada no dimensionamento MeDiNa. Portanto, é fundamental avaliar os custos de produção dessas misturas em condições geográficas específicas.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta e discute os resultados dos ensaios mecânicos realizados com a mistura asfáltica de controle e as misturas recicladas, bem como a determinação das espessuras das camadas de revestimento asfáltico. Além disso, são analisados o desempenho das misturas em relação ao trincamento por fadiga e ao afundamento por trilha de roda.

4.3.1. AVALIAÇÃO MECÂNICA

4.3.1.1. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA (RTI)

A Figura 30 apresenta os valores médios de resistência à tração indireta (RTI) para os três corpos de prova ensaiados em cada tipo de mistura, abrangendo os cinco grupos de misturas asfálticas avaliadas.

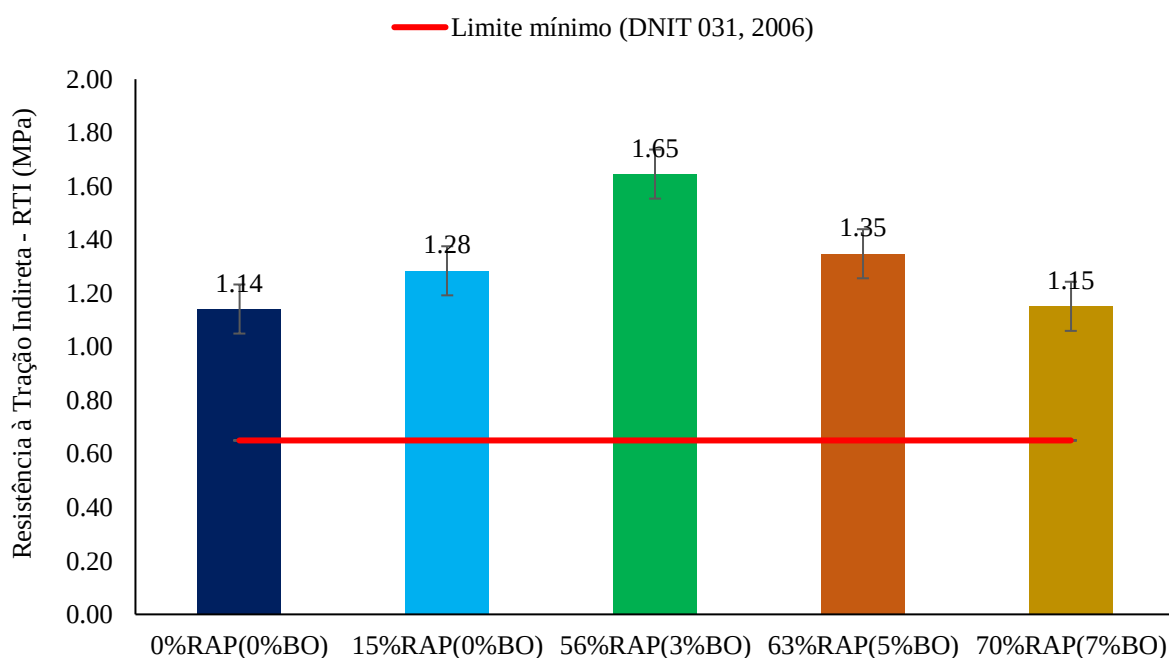


Figura 30 - Resistência à tração indireta das misturas asfálticas.

Todas as misturas atenderam ao valor mínimo normativo de 0,65 MPa (Figura 30). Observou-se um aumento nos valores de RTI com a adição de RAP, devido à característica rígida desse material. No entanto, a incorporação do agente rejuvenescedor, óleo de babaçu, reduziu a rigidez, resultando em menores valores de RTI à medida que o teor de óleo aumentou, mesmo em misturas com maiores porcentagens de RAP (63% e 70%). A mistura com 56% de RAP e 3% de óleo de babaçu apresentou a maior resistência à tração indireta, devido à elevada rigidez conferida pelo teor elevado de RAP (56%), aliado à menor quantidade de óleo (3%).

O aumento no RTI em relação à mistura asfáltica de controle 0%RAP (0%BO) foi de 12,28%, 44,74% e 18,42% para as misturas recicladas contendo 15%, 56% e 63% de RAP, respectivamente. A mistura com 70%RAP (7%BO) obteve um RTI equivalente ao da mistura de controle, mesmo apresentando o maior teor de RAP. Esse comportamento é atribuído à maior adição de óleo de babaçu, que contribuiu significativamente para reduzir a rigidez associada ao RAP, confirmando seu potencial como agente rejuvenescedor. O aumento da rigidez, conforme observado na Figura 30, está associado aos elevados teores de RAP nas misturas; contudo, verificou-se uma tendência de redução de rigidez com o acréscimo de óleo de babaçu. Esse resultado corrobora os dados da seção 3.3.2, onde amostras de ligante recuperado do RAP apresentaram redução no valor de PG contínuo de 18,52% com 3% de óleo e de 19,75% com 5% e 7% de óleo.

De Medeiros Melo Neto *et al.* (2022) incorporaram 40% de RAP e teores de 3% e 5% de ácido graxo proveniente da borra do óleo de soja como agente rejuvenescedor em misturas asfálticas recicladas. Os autores observaram que a adição desses teores resultou em valores de RTI equivalentes aos da mistura de referência, indicando que o agente rejuvenescedor foi capaz de restaurar parcialmente as propriedades do ligante envelhecido. No entanto, o teor de RAP utilizado foi inferior ao desta pesquisa, o que contribuiu para menores valores de RTI. Arruda (2021) relatou um comportamento similar ao observado neste estudo, em que o aumento do teor de RAP (sem agente rejuvenescedor) resultou em elevação dos valores de RTI devido ao incremento de rigidez proveniente do RAP. Observou-se um aumento de 67,82% com a adição de 50% de RAP em relação à mistura de referência, sendo esse ganho de resistência à tração justificado pela presença de polímeros no RAP utilizado.

Mendes (2024) identificou um aumento de 13,33% no valor de RTI ao incorporar 20% de RAP, valor ligeiramente superior ao obtido nesta pesquisa com a adição de 15% de RAP (12,28%). Da Costa *et al.* (2024) investigaram misturas asfálticas recicladas com 15%, 25% e 33% de RAP e teores de 4%, 6% e 8% de óleo de algodão, respectivamente. Com 15% de RAP e 4% de óleo, o RTI foi reduzido em 27,08%, e com 25% de RAP e 6% de óleo, a redução atingiu 31,25%. A combinação de 33% de RAP e 10% de óleo resultou em desempenho equivalente ao da mistura de controle no ensaio RTI. Neste estudo, a mistura com 70% de RAP e 7% de óleo de babaçu alcançou um RTI semelhante ao da mistura de controle 0%RAP (0%BO), evidenciando maior eficiência do óleo de babaçu em reduzir a rigidez, mesmo em menor teor. Os teores de ligante de projeto foram 3,6% e 3,3% para 6% e 10% de óleo de algodão, e 3,5% para o óleo de babaçu.

Carvalho (2022) incorporou 70% de RAP e 2% de óleo de girassol em peso do ligante asfáltico, com teor de ligante de projeto de 2,28%, obtendo um aumento de 63,54% na resistência à tração indireta em relação à mistura convencional. Esse aumento considerável é atribuído ao baixo teor de óleo utilizado, assim como ao reduzido teor de ligante de projeto. No presente estudo, o teor de ligante de projeto foi maior (3,5%) e o teor de óleo de babaçu em peso do ligante asfáltico também foi superior (7%), resultando em um efeito amolecedor mais pronunciado e comportamento equivalente ao de uma mistura asfáltica tradicional. Portanto, os efeitos do RAP em termos de proporção e tipo variam de acordo com o tipo e o teor do agente rejuvenescedor utilizado, sendo possível, por meio de uma dosagem adequada, alcançar resultados equivalentes aos de misturas tradicionalmente aplicadas em campo.

Beserra Costa *et al.* (2023a) investigaram misturas asfálticas recicladas com 50% e 75% de RAP, utilizando óleo residual de motor como agente de reciclagem. Os autores obtiveram valores de RTI de 1,24 MPa, 1,15 MPa e 1,02 MPa ao incorporar 75% de RAP com 12%, 15% e 18% de óleo residual, respectivamente. Para as misturas com 50% de RAP, os valores observados foram de 0,99 MPa, 1,04 MPa e 0,87 MPa para os mesmos teores de óleo. A mistura com 75% de RAP e 15% de óleo alcançou resultados de RTI equivalentes à mistura reciclada com 25% de RAP e sem agente de reciclagem. Observa-se que, dependendo do tipo de agente de reciclagem ou rejuvenescedor, o teor necessário para obter uma rigidez semelhante à de uma mistura tradicional pode variar consideravelmente. Neste estudo, a utilização de 70% de RAP e 7% de óleo de babaçu resultou em um RTI de 1,15 MPa,

comparável à composição analisada por Beserra Costa *et al.* (2023a) com 75% de RAP e 15% de óleo residual de motor, o que representa o dobro do teor de óleo utilizado.

A Figura 31 apresenta um gráfico de probabilidade normal com os dados obtidos no ensaio de RTI para todas as misturas, visando analisar se os valores se aproximam de uma distribuição normal. O coeficiente de determinação R^2 , apresentado na Figura 31, foi superior a 0,80, indicando um bom ajuste do modelo (Chicco; Warrens; Jurman, 2021). Isso indica que os dados seguem uma distribuição normal, com o modelo linear explicando 84,74% da variância.

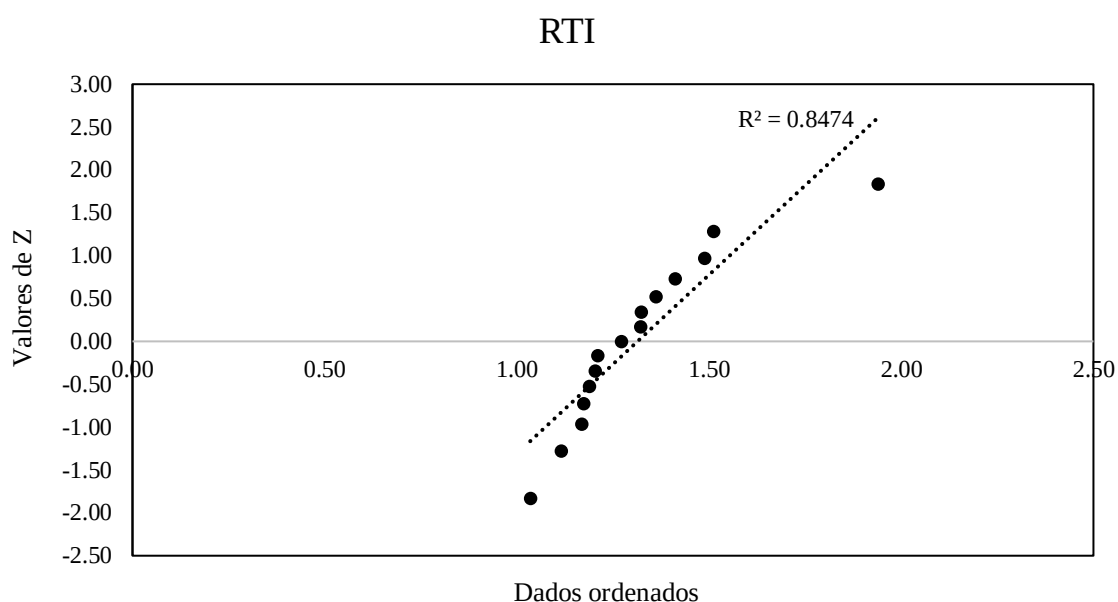


Figura 31 - Gráfico de probabilidade normal para o ensaio de resistência à tração indireta.

Para avaliar a significância dos dados, utilizou-se o teste estatístico ANOVA de fator único, com o propósito de verificar se as variações nos resultados de RTI entre as misturas asfálticas são estatisticamente significativas. Em seguida, aplicou-se o teste de Tukey para identificar quais misturas asfálticas apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre si. A Tabela 23 apresenta os resultados obtidos no teste ANOVA.

Tabela 23 - Dados estatísticos do teste ANOVA para o ensaio de resistência à tração indireta.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	p-valor	F crítico
Entre grupos	0,504838207	4	0,126209552	7,581983956	0,004462642	3,47805
Dentro dos grupos	0,166459798	10	0,01664598	-	-	-
Total	0,671298005	14	-	-	-	-
Tukey						
MQ dentro dos grupos				0,0166		
q tabelado				4,6500		
DMS				0,3464		
Módulo da diferença entre as médias						
0%RAP(0%BO) x 15%RAP(0%BO)				0,1428		
0%RAP(0%BO) x 56%RAP(3%BO)				0,5043*		
0%RAP(0%BO) x 63%RAP(5%BO)				0,2067		
0%RAP(0%BO) x 70%RAP(7%BO)				0,0101		
15%RAP(0%BO) x 56%RAP(3%BO)				0,3615*		
15%RAP(3%BO) x 63%RAP(5%BO)				0,0639		
15%RAP(0%BO) x 70%RAP(7%BO)				0,1327		
56%RAP(3%BO) x 63%RAP(5%BO)				0,2976		
56%RAP(3%BO) x 70%RAP(7%BO)				0,4942*		
63%RAP(5%BO) x 70%RAP(7%BO)				0,1966		

DMS = diferença mínima significativa, gl = grau de liberdade, MQ = quadrados médios, SQ = soma dos quadrados, * itálico = p-valor abaixo do nível de significância de 5% (0,05) e/ou valores acima da diferença mínima significativa (DMS).

Os dados do teste ANOVA (Tabela 23) indicaram uma diferença estatisticamente significativa entre as médias dos grupos de misturas asfálticas analisadas quanto à resistência à tração indireta, com p-valor abaixo do nível de significância de 5%. O valor de F calculado foi superior ao F crítico, sugerindo que a variabilidade entre as médias dos grupos é estatisticamente distinta. Assim, a DMS foi calculada para o teste de Tukey, identificando que as misturas 0%RAP(0%BO) e 56%RAP(3%BO), 15%RAP(0%BO) e 56%RAP(3%BO), e 56%RAP(3%BO) e 70%RAP(7%BO) apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre si. Isso se deve ao maior valor de RTI da mistura 56%RAP(3%BO), em comparação com os menores valores das misturas 0%RAP(0%BO) e 70%RAP(7%BO), indicando que a mistura 56%RAP(3%BO) tem RTI significativamente superior às misturas 0%RAP(0%BO) e 70%RAP(7%BO). Em geral, a adição de 70% de RAP com 7% de óleo de babaçu reduziu significativamente a rigidez da mistura reciclada em relação àquela com 56% de RAP e 3% de óleo, sendo mais relevante o aumento de 4% no teor de óleo do que o acréscimo de 14% de RAP na composição.

4.3.1.2. DANO POR UMIDADE INDUZIDA (LOTTMAN - RRTI)

A Figura 32 apresenta os valores médios de resistência retida à tração indireta (RRTI) das misturas asfálticas avaliadas. O valor mínimo de 70% de RRTI para misturas asfálticas é estabelecido pelas normas DNIT 031 (2016) e AASHTO T283 (2021). No entanto, a metodologia SUPERPAVE adota um limite mínimo de 80% de RRTI para resistência das misturas ao dano causado pela água. Conforme mostrado na Figura 32, todas as misturas analisadas atenderam aos requisitos mínimos de 70% e 80% de RRTI, indicando resistência ao dano por umidade.

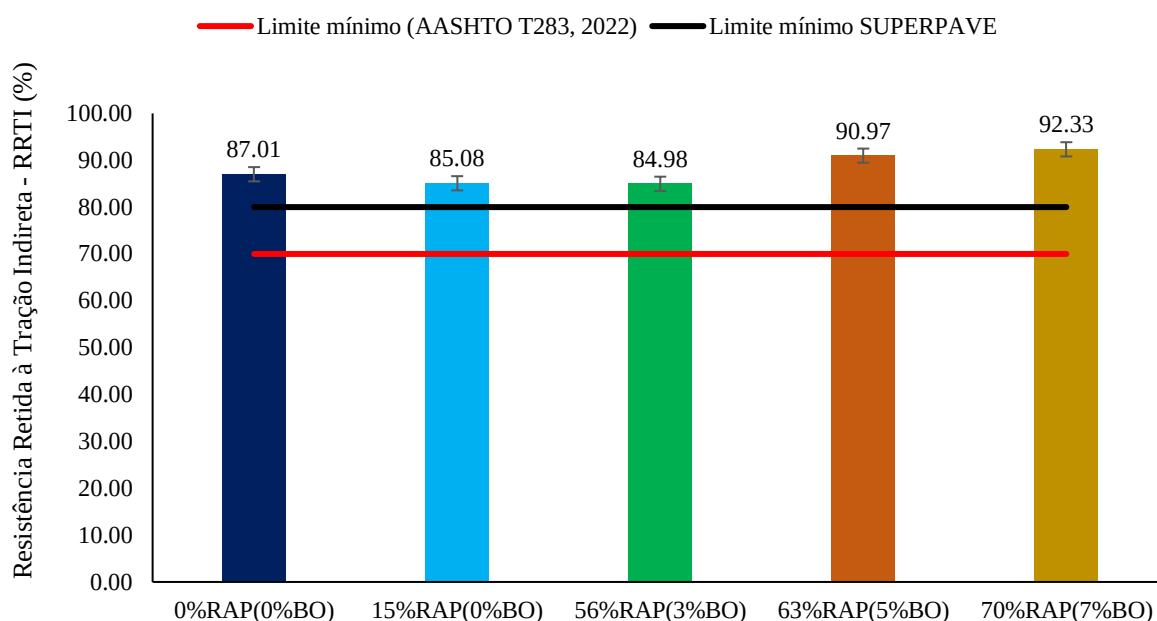


Figura 32 - Resistência retida à tração indireta das misturas asfálticas.

A utilização de teores mais elevados de óleo de babaçu (5% e 7%), mesmo em combinação com maiores proporções de RAP, resultou em um leve aumento na resistência ao dano causado pela umidade. As misturas 63%RAP(5%BO) e 70%RAP(7%BO) apresentaram aumentos de 4,55% e 6,11%, respectivamente. Durante o processo de dosagem das misturas recicladas, observou-se que, com a adição de maiores quantidades de óleo de babaçu, houve um aumento no desprendimento do ligante do RAP ou uma melhor aderência do ligante ao agregado granítico, evidenciada pelo maior recobrimento dos agregados pelo ligante asfáltico.

Isso pode ter contribuído para a maior resistência das misturas com 5% e 7% de óleo de babaçu em comparação às misturas sem óleo ou com apenas 3%.

De Medeiros Melo Neto *et al.* (2022) observaram um aumento similar no valor de RRTI em comparação à mistura de referência ao utilizarem 40% de RAP e 3% e 5% de ácido graxo da borra do óleo de soja, com aumentos de 2,26% e 5,35%, respectivamente. Cooper *et al.* (2017) também identificaram maior resistência ao dano causado pela umidade em misturas asfálticas recicladas em comparação às misturas convencionais.

Pradhan e Sahoo (2019) avaliaram a suscetibilidade de misturas recicladas com teores de RAP variando de 30% a 70% e observaram um aumento no valor de RRTI para misturas contendo até 40% de RAP, diferentemente deste estudo, onde as misturas com 70% de RAP e 7% de óleo de babaçu apresentaram o melhor desempenho. Esse resultado pode estar relacionado às propriedades químicas do óleo de babaçu e ao seu efeito lubrificante, observado durante o processo de mistura nas dosagens.

Goli e Latifi (2020) investigaram misturas asfálticas recicladas compostas por 40% de RAP e agregados calcários. Os autores relataram que a adição do rejuvenescedor Sasobit, em um teor de 3%, juntamente com 40% de RAP, resultou em maior resistência à umidade em comparação com a mistura contendo 40% de RAP sem rejuvenescedor. Yousefi *et al.* (2021) avaliaram misturas recicladas com 50% de RAP e diferentes agentes rejuvenescedores (Sasobit, Zeolite, Kaowax e PAWMA), observando que o uso desses agentes reduziu os valores de RRTI nas misturas recicladas, com exceção do aditivo PAWMA. Assim, o tipo de rejuvenescedor pode influenciar positiva ou negativamente na resistência ao dano por umidade.

Arruda (2021) obteve um valor de RRTI para a mistura asfáltica reciclada com 50% de RAP equivalente ao da mistura de referência (aproximadamente 65% de RRTI), sendo os valores de RRTI do estudo de Arruda (2021) inferiores aos observados neste estudo. Essa diferença pode ser explicada pelo teor de cal hidratada utilizado em cada pesquisa: enquanto Arruda (2021) aplicou apenas 1,9% de cal nas misturas, neste estudo o teor de cal nas misturas recicladas foi de 3%. O uso da cal como material de enchimento é comum em pesquisas que utilizam agregado granítico, com o objetivo de reduzir a acidez desses agregados, compostos por alta porcentagem de sílica, e melhorar a adesividade do ligante aos agregados (Hesami *et al.*, 2013).

Mendes (2024) avaliou a resistência ao dano por umidade induzida em misturas asfálticas recicladas com 20% de RAP e obteve valores de RRTI semelhantes aos da mistura asfáltica tradicional. A mistura reciclada apresentou uma leve redução de 3,75% em comparação com a mistura de referência, similar aos resultados deste estudo, que avaliou o uso de 15% de RAP, também sem agente rejuvenescedor, com uma redução de apenas 2,22%. Suzuki *et al.* (2023) analisaram o comportamento de misturas recicladas a quente com teores de RAP variando entre 0% e 65%, sem agente de reciclagem, e observaram uma tendência de redução na resistência ao dano por umidade à medida que o teor de RAP aumentava. Esses resultados reforçam a necessidade e a importância do uso de agentes rejuvenescedores para otimizar o desempenho mecânico das misturas recicladas, especialmente em casos com altos teores de RAP (>30%).

Da Costa *et al.* (2024) observaram que a mistura asfáltica reciclada com 33% de RAP e 10% de óleo de algodão bruto apresentou um valor de RRTI semelhante ao da mistura de referência, em torno de 78,8%. Essa mistura reciclada mostrou maior resistência ao dano por umidade em comparação com as misturas contendo 15% de RAP e 4% de óleo, e 25% de RAP e 6% de óleo. Esses resultados estão de acordo com os obtidos neste estudo, no qual o uso de maiores teores de óleo de babaçu, mesmo combinado com altos teores de RAP, otimizou a resistência ao dano por umidade das misturas recicladas. Carvalho (2022) também identificou um comportamento semelhante em misturas recicladas com 70% de RAP e 2% de óleo de girassol, em que o desempenho foi ligeiramente superior ao da mistura tradicional, com valores de 74% e 72%, respectivamente.

Beserra Costa *et al.* (2023a) relataram valores inferiores de RRTI para misturas asfálticas com 75% de RAP e óleo residual de motor nos teores de 12%, 15% e 18%. Os valores de RRTI obtidos foram de 61,64%, 62,86% e 65,08%, respectivamente, inferiores ao da mistura de controle, que consistia em uma mistura de referência com 25% de RAP e sem agente de reciclagem (69,70%). Comportamento semelhante foi observado nas misturas com 50% de RAP e os mesmos teores de óleo, com valores de RRTI de 63,77%, 62,90% e 61,54% para 12%, 15% e 18% de óleo residual de motor, respectivamente. Esses resultados indicam que estudos que utilizaram óleos vegetais como agentes rejuvenescedores obtiveram melhor desempenho frente ao dano por umidade induzida em comparação com óleo residual de motor.

A Figura 33 apresenta o gráfico de probabilidade normal com os valores de RRTI obtidos no ensaio de dano por umidade induzida para todas as misturas, com o objetivo de verificar a aderência dos dados a uma distribuição normal. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,8493, indicando que os dados seguem uma distribuição normal, com o modelo linear explicando 84,93% da variância.

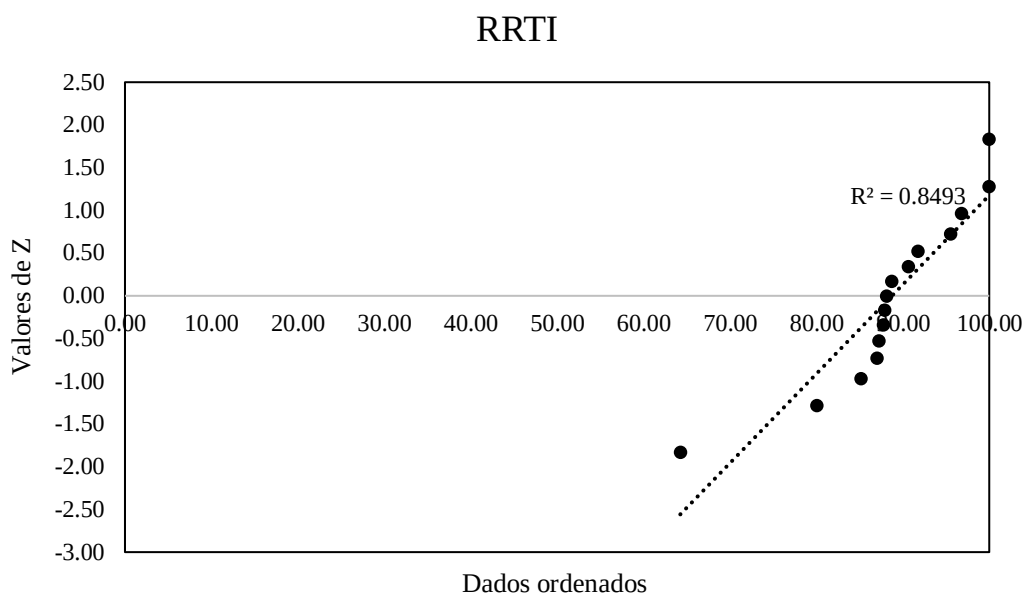


Figura 33 - Gráfico de probabilidade normal para o ensaio de resistência retida à tração indireta.

Após a confirmação da normalidade dos dados, a significância foi avaliada por meio do teste estatístico ANOVA de fator único. Além disso, o teste de Tukey foi aplicado para identificar quais misturas asfálticas apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre si. A Tabela 24 apresenta os resultados do teste ANOVA e Tukey.

O teste estatístico ANOVA não indicou diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos grupos de misturas asfálticas analisadas em relação à resistência retida à tração indireta, com p-valor superior ao nível de significância de 5% (0,05). O valor de F calculado foi inferior ao F crítico, indicando que a variabilidade entre as médias dos grupos não é estatisticamente relevante. Assim, a DMS foi calculada para o teste de Tukey, e verificou-se que todos os valores de diferença entre as médias dos pares de misturas foram inferiores à DMS, confirmando a ausência de diferença estatisticamente significativa entre as médias. Portanto, as misturas asfálticas demonstraram resistência equivalente ao dano por umidade.

Tabela 24 - Dados estatísticos do teste ANOVA para o ensaio de resistência retida à tração indireta.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	p-valor	F crítico
Entre grupos	389,136	4	97,28394481	1,423344826	0,295619411	3,47805
Dentro dos grupos	683,488	10	68,34882387			
Total	1072,62	14				
Tukey						
MQ dentro dos grupos				68,3488		
q tabelado				4,6500		
DMS				22,1951		
Módulo da diferença entre as médias						
0%RAP(0%BO) x 15%RAP(0%BO)				6,2252		
0%RAP(0%BO) x 56%RAP(3%BO)				8,7344		
0%RAP(0%BO) x 63%RAP(5%BO)				1,0123		
0%RAP(0%BO) x 70%RAP(7%BO)				4,5880		
15%RAP(0%BO) x 56%RAP(3%BO)				14,9596		
15%RAP(3%BO) x 63%RAP(5%BO)				5,2129		
15%RAP(0%BO) x 70%RAP(7%BO)				10,8132		
56%RAP(3%BO) x 63%RAP(5%BO)				9,7467		
56%RAP(3%BO) x 70%RAP(7%BO)				4,1464		
63%RAP(5%BO) x 70%RAP(7%BO)				5,6003		

DMS = diferença mínima significativa, gl = grau de liberdade, MQ = quadrados médios, SQ = soma dos quadrados.

4.3.1.3. MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

A Figura 34 apresenta os valores médios do módulo de resiliência das misturas asfálticas de controle e recicladas. Observou-se que incorporação de RAP em todos os teores testados resultou em um aumento no módulo de resiliência. As misturas asfálticas recicladas com agente rejuvenescedor mostraram uma tendência de redução no módulo de resiliência à medida que a taxa de agente rejuvenescedor aumentava, devido à sua ação de rejuvenescimento.

O aumento do MR das misturas recicladas em relação à mistura de controle 0%RAP(0%BO) foi de 29,81%, 82,78%, 61,64% e 42,19% para as adições de 15%, 56%, 63% e 70% de RAP, respectivamente. Entre as misturas com altos teores de RAP (>50%), a que apresentou o menor módulo de resiliência foi a mistura com 70%RAP(7%BO), ou seja, a

mistura com o maior teor de RAP e a maior quantidade de agente rejuvenescedor. A adição de maiores teores de RAP à mistura reciclada aumenta sua rigidez em comparação à mistura asfáltica tradicional, mas essa rigidez pode ser atenuada com a escolha adequada do tipo e da quantidade de agente rejuvenescedor (Kaseer *et al.*, 2020).

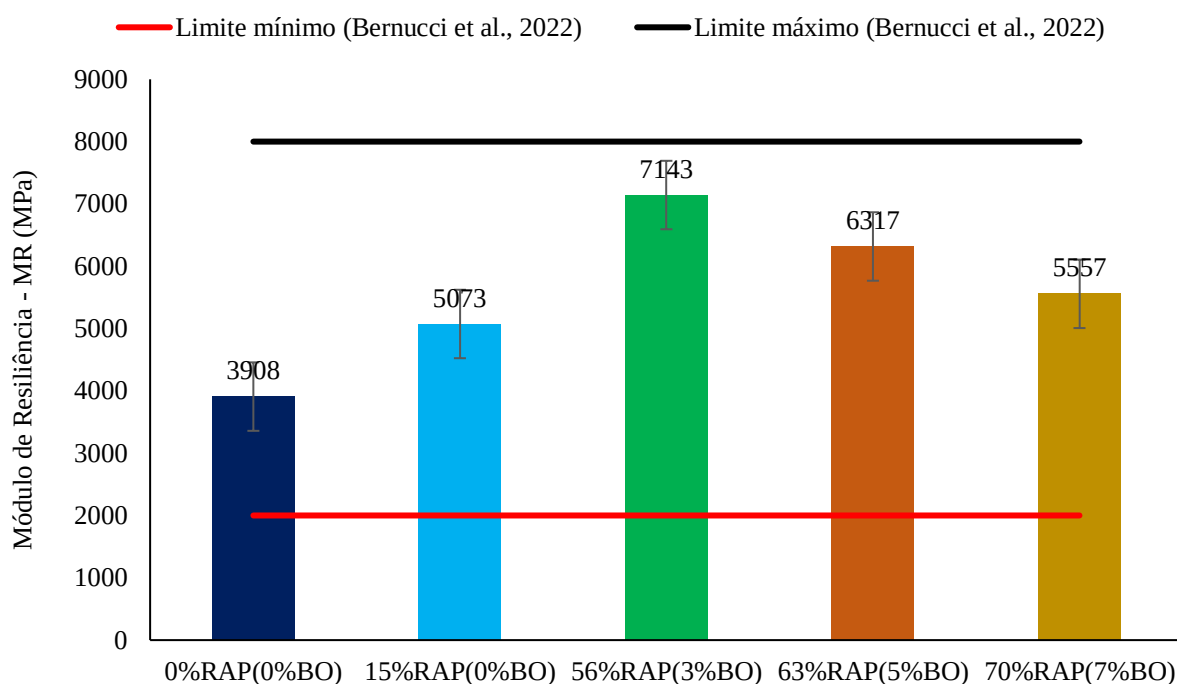


Figura 34 - Módulo de resiliência das misturas asfálticas.

Mendes (2024) avaliou misturas asfálticas recicladas com 20% de RAP e observou um aumento de 44,49% no módulo de resiliência em relação à mistura de referência. No presente estudo, o uso de 15% de RAP resultou em um aumento de 29,81%, valor inferior ao reportado por Mendes (2024), o que está alinhado com os achados desta pesquisa, indicando que quanto maior o teor de RAP adicionado à mistura, maior tende a ser o aumento no valor do MR em relação à mistura tradicional. A pesquisa de Arruda (2021) também corrobora esses resultados, tendo observado aumentos no módulo de resiliência de 16,38%, 53,96% e 79,30% com a incorporação de 10%, 30% e 50% de RAP, sem o uso de agente rejuvenescedor. O aumento obtido com 50% de RAP (79,30%) foi semelhante ao observado neste estudo com a adição de 56% de RAP (82,78%).

Da Costa *et al.* (2024) observaram um aumento de 14,97% no módulo de resiliência ao adicionar 33% de RAP e 10% de óleo de algodão bruto à mistura asfáltica reciclada, em

comparação à mistura convencional. No entanto, os autores relataram reduções nos valores de MR de 13,27% e 13,40% com a adição de 15% e 25% de RAP, respectivamente, devido ao uso conjunto de óleo de algodão em teores de 4% e 6%. Nesse caso, apesar da incorporação de RAP, a alta taxa de agente rejuvenescedor compensou a rigidez do RAP, resultando em um MR inferior ao da mistura convencional. A literatura (Arambula-Mercado *et al.*, 2018; Song; Huang; Shu, 2018; de Medeiros Melo Neto *et al.*, 2022; Beserra Costa *et al.*, 2023a; de Medeiros Melo Neto *et al.*, 2023b) tem destacado a necessidade do uso de agentes rejuvenescedores em situações onde o teor de RAP ultrapassa 30%.

Carvalho (2022) obteve resultados semelhantes aos de Da Costa *et al.* (2024) ao adicionar 30% de RAP e 2% de óleo de girassol, com uma redução de 8,32% no valor do MR em comparação à mistura convencional. Isso está relacionado ao fato de que 30% de RAP não exige o uso de agente rejuvenescedor, e sua adição pode diminuir a rigidez da mistura abaixo da referência. No entanto, ao incorporar 70% de RAP e 2% de óleo de girassol, a autora observou um aumento de 64,44% no valor do MR em relação à mistura de controle. Esse resultado indica que o elevado teor de RAP, associado a uma baixa quantidade de agente rejuvenescedor (2%), não foi suficiente para reduzir a rigidez da mistura a ponto de torná-la equivalente à mistura convencional.

Beserra Costa *et al.* (2023a) relataram reduções consideráveis no módulo de resiliência de misturas asfálticas recicladas contendo 75% e 50% de RAP, combinadas com óleo residual de motor nos teores de 12%, 15% e 18%, em comparação à mistura reciclada com 25% de RAP e sem agente rejuvenescedor. As reduções no MR para as misturas com 75% de RAP e os três teores de agente foram de 4,38%, 19,46% e 33,48%, respectivamente, enquanto para a adição de 50% de RAP, as reduções foram de 47,98%, 51,42% e 58,08%. Essas diminuições substanciais estão associadas às elevadas taxas de agente de reciclagem, que reduziram consideravelmente a rigidez e a viscosidade do asfalto. Portanto, compreende-se que a dosagem do rejuvenescedor não deve ser excessiva, pois misturas com menor rigidez tendem a ser mais deformáveis e apresentam maior suscetibilidade ao afundamento por trilha de roda.

O gráfico de probabilidade normal com os valores de MR para todas as misturas asfálticas é apresentado na Figura 35. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,9815, próximo a 1,00, indicando que os dados seguem fortemente uma tendência de distribuição normal, com o modelo linear explicando 98,15% da variância.

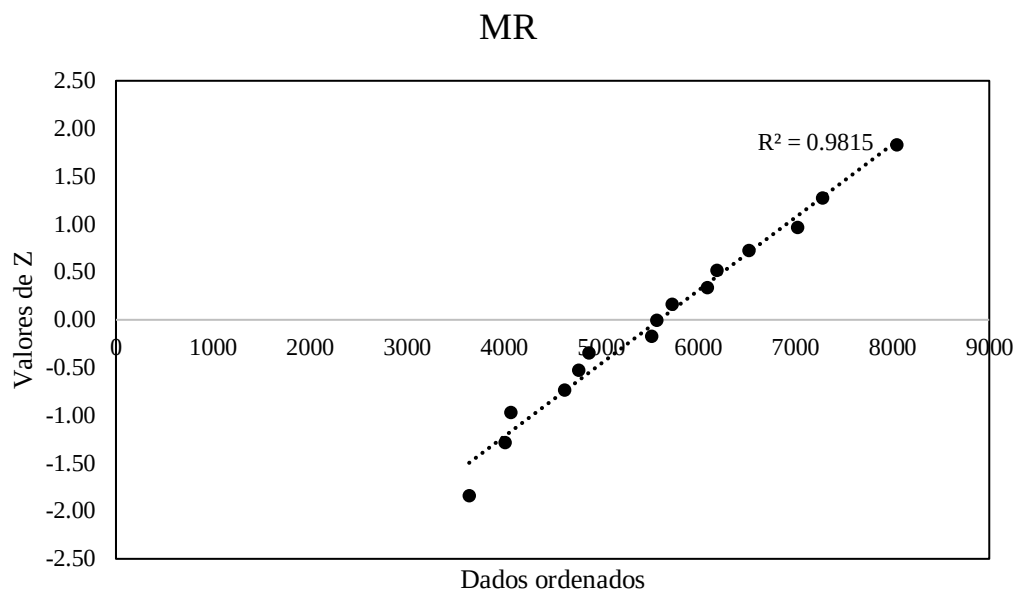


Figura 35 - Gráfico de probabilidade normal para o ensaio de módulo de resiliência.

A Tabela 25 apresenta os dados do teste estatístico ANOVA de fator único e Tukey. Verificou-se uma diferença estatisticamente significativa entre as médias dos grupos de misturas asfálticas analisadas quanto ao módulo de resiliência, com p-valor abaixo do nível de significância de 5% (0,05). O valor de F calculado foi superior ao F crítico, indicando que a variabilidade entre as médias dos grupos é estatisticamente diferente.

O valor de DMS foi determinado pelo teste de Tukey, permitindo identificar quais misturas asfálticas apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre si. Conforme mostrado na Tabela 25, as misturas 0%RAP(0%BO) e 56%RAP(3%BO), 0%RAP(0%BO) e 63%RAP(5%BO), e 15%RAP(0%BO) e 56%RAP(3%BO) apresentaram diferenças estatisticamente significativas. Isso é atribuído à maior rigidez observada nas misturas com 56% e 63% de RAP em comparação à mistura de controle. As misturas recicladas com 56% de RAP e 3% de óleo, assim como com 63% de RAP e 5% de óleo, mostraram um aumento significativo em rigidez em relação à mistura de controle. Embora a mistura com 70% de RAP e 7% de óleo de babaçu tenha o maior teor de RAP entre as misturas testadas, a quantidade de óleo adicionada foi suficiente para reduzir sua rigidez, tornando-a equivalente às demais misturas.

Tabela 25 - Dados estatísticos do teste ANOVA para o ensaio de módulo de resiliência.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	p-valor	F crítico
Entre grupos	18107616,4	4	4526904,1	8,867065437	0,002521644	3,47805
Dentro dos grupos	5105301,333	10	510530,1333			
Total	23212917,73	14				
Tukey						
MQ dentro dos grupos				510530,1333		
q tabelado				4,6500		
DMS				1918,2403		
Módulo da diferença entre as médias						
0%RAP(0%BO) x 15%RAP(0%BO)				1165,0000		
0%RAP(0%BO) x 56%RAP(3%BO)				3234,6667*		
0%RAP(0%BO) x 63%RAP(5%BO)				2408,6667*		
0%RAP(0%BO) x 70%RAP(7%BO)				1649,0000		
15%RAP(0%BO) x 56%RAP(3%BO)				2069,6667*		
15%RAP(3%BO) x 63%RAP(5%BO)				1243,6667		
15%RAP(0%BO) x 70%RAP(7%BO)				484,0000		
56%RAP(3%BO) x 63%RAP(5%BO)				826,0000		
56%RAP(3%BO) x 70%RAP(7%BO)				1585,6667		
63%RAP(5%BO) x 70%RAP(7%BO)				759,6667		

DMS = diferença mínima significativa, gl = grau de liberdade, MQ = quadrados médios, SQ = soma dos quadrados, * itálico = p-valor abaixo do nível de significância de 5% (0,05) e/ou valores acima da diferença mínima significativa (DMS).

4.3.1.4. FLOW NUMBER (FN)

A Figura 36 apresenta os valores médios do *Flow Number* (FN) das misturas asfálticas avaliadas. Observa-se que as misturas recicladas demonstraram maior resistência à deformação permanente em comparação à mistura de controle. Os aumentos na resistência foram de 142,38%, 1.132,12%, 869,54% e 591,39% com a incorporação de 15%, 56%, 63% e 70% de RAP, respectivamente. O aumento no módulo de resiliência das misturas recicladas, mostrado na Figura 34, indicou maior rigidez, o que se refletiu no ganho de resistência à deformação plástica observado na Figura 36. A maior resistência foi registrada na mistura com 56% de RAP e 3% de óleo de babaçu, que apresentava a menor taxa de óleo. À medida que o teor de óleo nas misturas recicladas aumenta, a rigidez é gradualmente reduzida (Yan *et al.*, 2021).

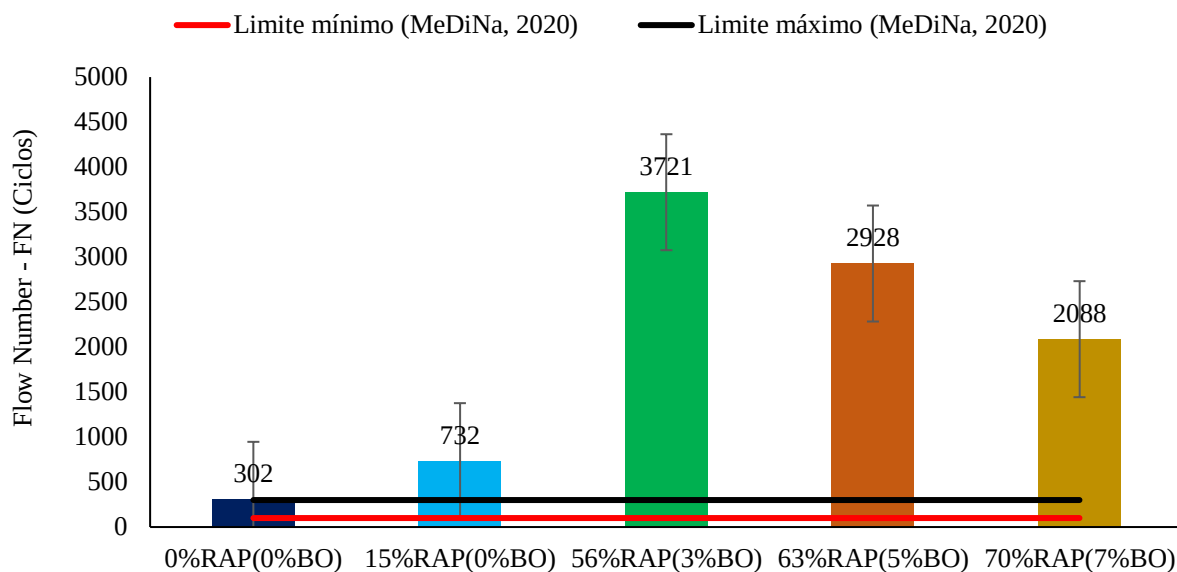


Figura 36 -*Flow Number* das misturas asfálticas.

A tendência observada na seção 3.3.2. para os valores de J_{nr} a $3,2 \text{ kPa}^{-1}$ também foi constatada nos resultados de *Flow Number* (Figura 36), onde o aumento do teor de óleo de babaçu no ligante recuperado resultou em aumento de J_{nr} e redução de FN, evidenciando a ação amolecedora do óleo. Os altos valores de FN nas misturas recicladas, apresentados na Figura 36, são atribuídos à rigidez conferida pelos elevados teores de RAP (>50%) presentes nas misturas.

Nascimento (2014) sugere valores mínimos e máximos de *Flow Number* (FN) para misturas asfálticas de acordo com o nível de tráfego (N). Para tráfego médio ($10^6 \leq N \leq 10^7$), conforme adotado na dosagem SUPERPAVE das misturas avaliadas, recomenda-se que os valores de FN sejam ≥ 100 e < 300 ciclos. A Tabela 26 apresenta os critérios de FN em função do nível de tráfego. Assim, a mistura 15%RAP(0%BO) mostrou-se adequada para rodovias de tráfego pesado, enquanto as misturas 56%RAP(3%BO), 63%RAP(5%BO) e 70%RAP(7%BO) se mostraram apropriadas para rodovias de tráfego extremamente pesado.

É importante destacar que essas classificações das misturas são baseadas em condições de tráfego normais que consideram velocidades superiores a 60 km/h, vias sem interseções, sem terceira faixa e com temperatura máxima moderada do revestimento asfáltico (temperatura máxima média de sete dias consecutivos igual ou inferior a 64°C). No entanto, é essencial avaliar a resistência dessas misturas ao trincamento por fadiga, uma vez que

misturas mais rígidas tendem a apresentar boa resistência ao afundamento plástico, mas podem ser mais suscetíveis ao trincamento por fadiga.

Tabela 26 - Valores limites de *Flow Number* em função do nível de tráfego.

FN (Ciclos)	Nível de tráfego (condições normais)	Nível de tráfego (condições severas)
≤ 100	$N < 10^6$	Não recomendado
$100 \leq FN < 300$	$10^6 \leq N < 10^7$	$N < 10^6$
$300 \leq FN < 750$	$10^7 \leq N < 10^8$	$10^6 \leq N < 10^7$
$750 \leq FN < 2000$	$N \geq 10^8$	$10^7 \leq N < 10^8$
$FN \geq 2000$	-	$N \geq 10^8$

Fonte: Adaptado de Nascimento (2014) e MeDiNa (2020a).

Mendes (2024) avaliou misturas asfálticas com 20% de RAP, sem o uso de agente rejuvenescedor, e observou um aumento de aproximadamente 170% na resistência à deformação permanente em comparação à mistura de referência. Esse resultado está em consonância com o presente estudo, onde a adição de 15% de RAP, também sem agente rejuvenescedor, resultou em um aumento de 142,38% no *Flow Number*. Arruda (2021) investigou misturas asfálticas com 10%, 30% e 50% de RAP, igualmente sem agente rejuvenescedor, e verificou aumentos nos valores de FN de 70,52%, 366,32% e 683,16%, respectivamente, em comparação a uma mistura de controle (sem RAP). Esses estudos indicam que, à medida que mais RAP é incorporado à mistura, maior é a resistência à deformação permanente.

Da Costa *et al.* (2024) observaram um aumento nos valores de FN para misturas recicladas dosadas com 15%, 25% e 33% de RAP e 4%, 6% e 10% de óleo de algodão, respectivamente. A tendência de aumento na resistência à deformação permanente com o incremento de RAP também foi constatada pelos autores. Os aumentos de FN em relação à mistura de referência foram de 14,06%, 45,40% e 87,57% para as respectivas misturas. Yousefi *et al.* (2021) relataram que, em comparação com a mistura convencional, a adição de 50% de RAP aumentou o valor de FN em 332,2%. Para misturas recicladas com 50% de RAP e contendo agentes de reciclagem como Sasobit, Zeolita, Kaowax (aditivo orgânico) e PAWMA (aditivo químico), os aumentos nos valores de FN foram de 19,2%, 269,9%, 49,0% e 15,3%, respectivamente. Isso demonstra que o uso desses aditivos minimizou o efeito de rigidez do RAP nas misturas recicladas.

De Medeiros Melo Neto *et al.* (2022) observaram um aumento de 558,94% no valor de FN ao incorporar 40% de RAP em comparação à mistura convencional. Esse aumento no

valor de FN foi reduzido quando os autores avaliaram a mistura reciclada com 40% de RAP e o agente rejuvenescedor ácido graxo da borra do óleo de soja nos teores de 3% e 5%, resultando em aumentos de FN de 411,26% e 384,77%, respectivamente. O efeito amolecedor do agente rejuvenescedor, à medida que maiores quantidades são adicionadas à mistura reciclada, foi confirmado no presente estudo, corroborando os achados de De Medeiros Melo Neto *et al.* (2022).

Carvalho (2022) relatou um aumento de 464,29% no valor de FN ao adicionar 30% de RAP e 2% de óleo de girassol à mistura asfáltica reciclada, e um acréscimo de 6.580% ao incorporar 70% de RAP e 2% de óleo de girassol, em comparação à mistura convencional. Esse aumento expressivo no FN da mistura com 70% de RAP é atribuído à baixa taxa de agente rejuvenescedor (2%). No presente estudo, a adição de 70% de RAP com 7% de óleo de babaçu resultou em um aumento de FN de 591,39%, indicando uma mistura consideravelmente menos rígida que a do estudo de Carvalho (2022). É fundamental avaliar até que ponto é vantajoso obter uma mistura asfáltica com elevado valor de FN, considerando sua possível suscetibilidade ao trincamento prematuro (Sreedhar; Coleri; Haddadi, 2018).

Suzuki *et al.* (2023) também observaram valores de FN superiores para misturas com 10%, 20%, 25%, 35%, 50% e 65% de RAP em comparação à mistura de referência (0%RAP), corroborando com os resultados obtidos nesta pesquisa, onde a adição de RAP aumentou a resistência da mistura à deformação permanente. Chen *et al.* (2021) afirmam em seu estudo que o uso de RAP, mesmo quando combinado com agentes rejuvenescedores, promove o aumento do *Flow Number* das misturas, corroborando os resultados apresentados neste trabalho.

A Figura 37 ilustra o gráfico de probabilidade normal com os valores de FN para todas as misturas asfálticas. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,8604, indicando que os dados seguem uma distribuição normal, com o modelo linear explicando 86,04% da variância. A Tabela 27 apresenta os dados estatísticos dos testes ANOVA e Tukey realizados com as amostras submetidas ao ensaio de *Flow Number*.

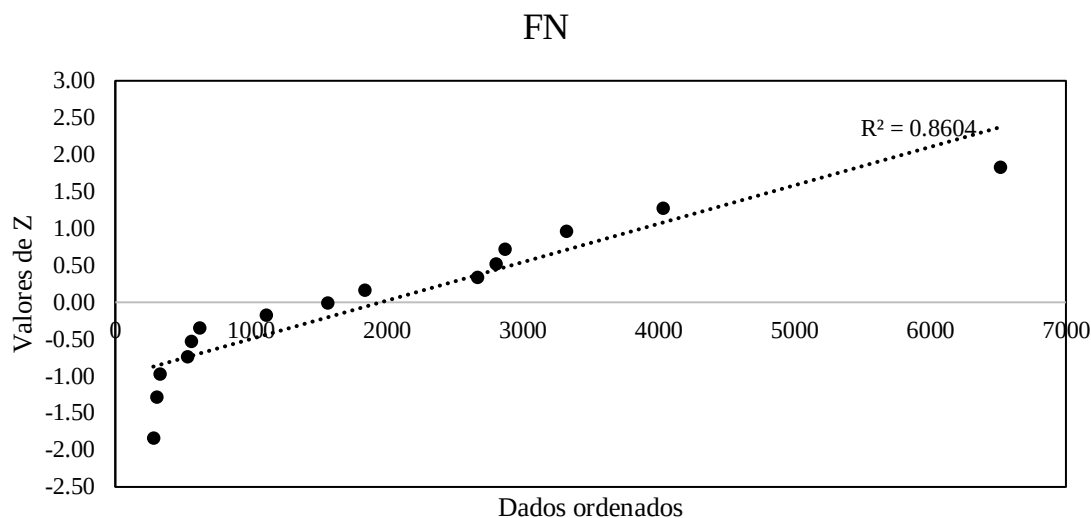


Figura 37 - Gráfico de probabilidade normal para o ensaio de *Flow Number*.

Tabela 27 - Dados estatísticos do teste ANOVA para o ensaio de *Flow Number*.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	p-valor	F crítico
Entre grupos	24926325.6	4	6231581.4	3.290696947	0.057614455	3.47805
Dentro dos grupos	18936965.33	10	1893696.533			
Total	43863290.93	14				
Tukey						
MQ dentro dos grupos				1893696.5333		
q tabelado				4.6500		
DMS				3694.4306		
Módulo da diferença entre as médias						
0%RAP(0%BO) x 15%RAP(0%BO)				430.0000		
0%RAP(0%BO) x 56%RAP(3%BO)				3418.3333		
0%RAP(0%BO) x 63%RAP(5%BO)				2626.0000		
0%RAP(0%BO) x 70%RAP(7%BO)				1785.3333		
15%RAP(0%BO) x 56%RAP(3%BO)				2988.3333		
15%RAP(3%BO) x 63%RAP(5%BO)				2196.0000		
15%RAP(0%BO) x 70%RAP(7%BO)				1355.3333		
56%RAP(3%BO) x 63%RAP(5%BO)				792.3333		
56%RAP(3%BO) x 70%RAP(7%BO)				1633.0000		
63%RAP(5%BO) x 70%RAP(7%BO)				840.6667		

DMS = diferença mínima significativa, gl = grau de liberdade, MQ = quadrados médios, SQ = soma dos quadrados.

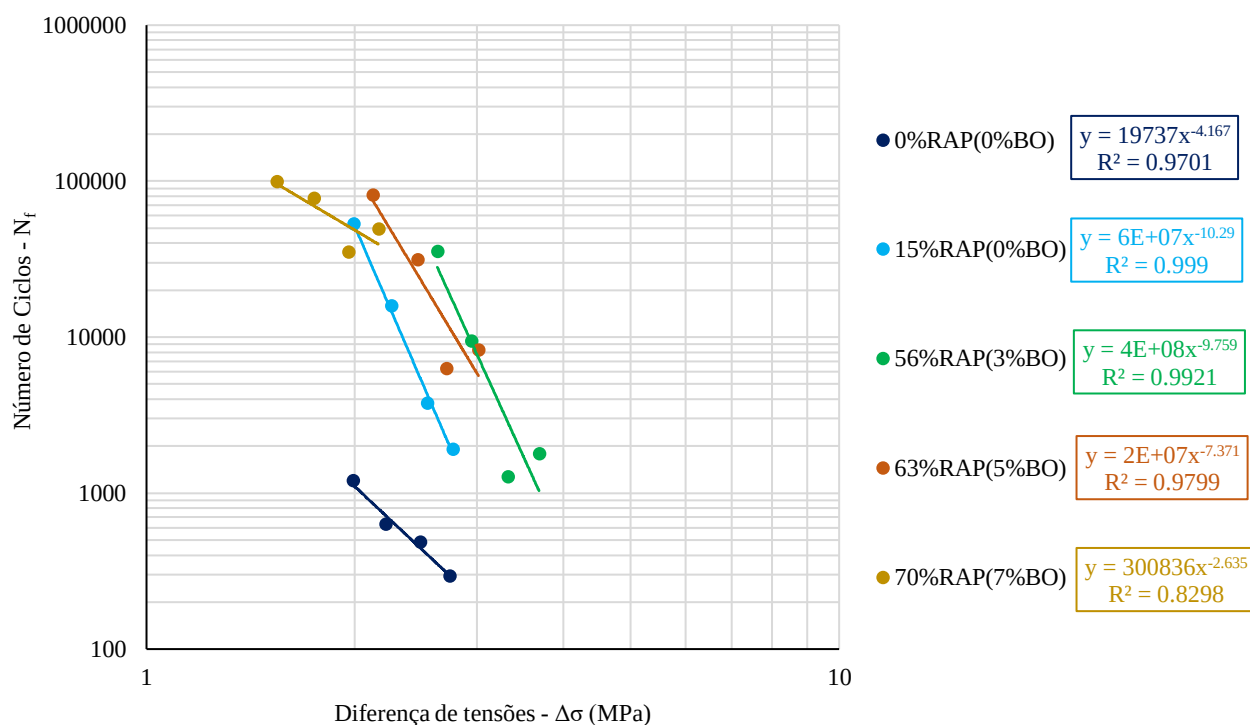
A Tabela 27 mostra que não há diferença estatisticamente significativa entre as médias dos grupos de misturas asfálticas analisadas quanto ao *Flow Number*, com p-valor superior ao

nível de significância de 5% (0,05). O valor de F calculado foi inferior ao F crítico, indicando que a variabilidade entre as médias dos grupos não é estatisticamente relevante. A diferença mínima significativa (DMS) foi calculada no teste de Tukey, e verificou-se que todos os valores de diferença entre as médias dos pares de misturas foram inferiores à DMS, confirmando a ausência de significância entre as médias dos valores de FN das misturas asfálticas. Portanto, as misturas asfálticas apresentaram resistência à deformação permanente estatisticamente equivalente; no entanto, receberam classificações de aplicação distintas em função dos valores absolutos de resistência, indicando que as misturas recicladas são mais resistentes à deformação permanente.

4.3.1.5. FADIGA POR TRAÇÃO INDIRETA (FTI)

A Figura 38 apresenta os resultados do ensaio de fadiga por tração indireta, em um diagrama log-log, relacionando o número de ciclos (N_f) com a diferença de tensões ($\Delta\sigma$) e o número de ciclos (N_f) com a deformação específica resiliente (ϵ_r).

(a)



(b)

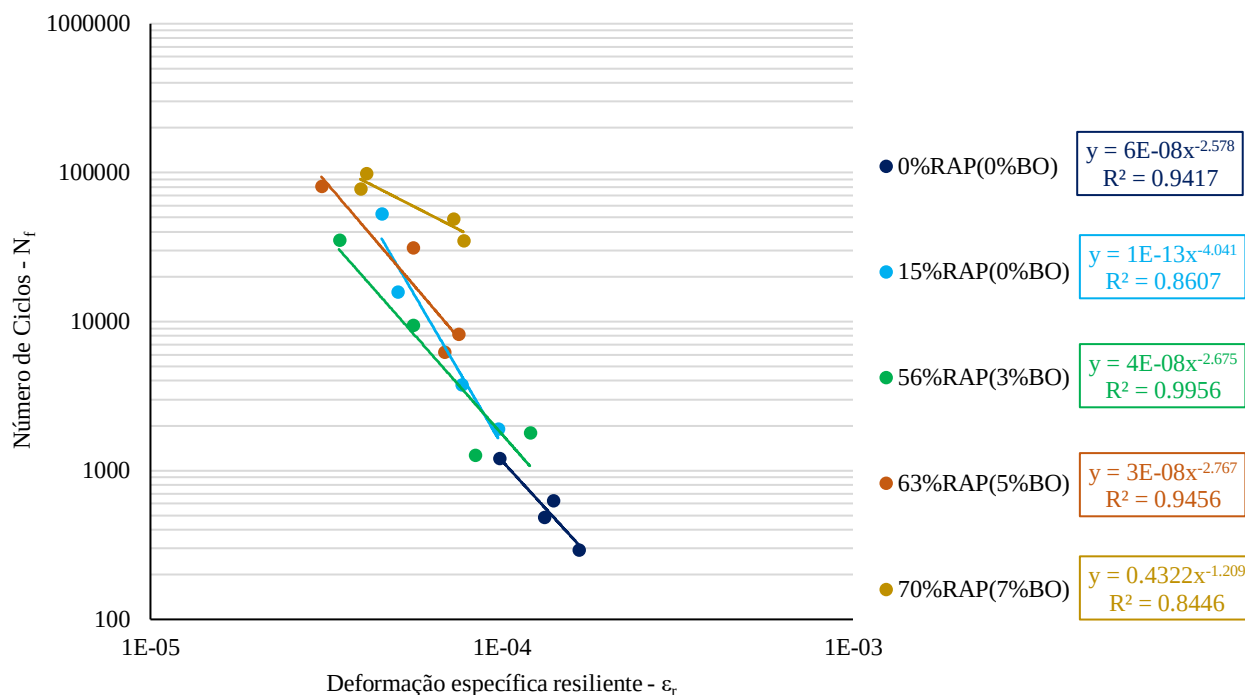


Figura 38 - Número de ciclos até a ruptura *versus*: (a) diferença de tensões, (b) deformação específica resiliente.

Os diagramas da Figura 38 apresentam as linhas de tendência logarítmicas ajustadas aos resultados (curvas de *Wohler*), com as equações dos modelos de fadiga de cada grupo de mistura asfáltica e seus respectivos coeficientes de ajuste (R^2). A partir dessas equações, foram obtidos os parâmetros K_2 e n_2 por meio do gráfico da Figura 38 (a) e os parâmetros K_3 e n_3 por meio do gráfico da Figura 38 (b), conforme mostrado na Tabela 28.

A análise dos valores de R^2 apresentados na Tabela 28 revela que os modelos que melhor explicaram a variabilidade dos dados em torno da média, com R^2 mais próximo de 1, foram os das misturas asfálticas 0%RAP(0%BO), 56%RAP(3%BO) e 63%RAP(5%BO). A mistura asfáltica reciclada 70%RAP(7%BO) apresentou os menores valores de R^2 , mas, ainda assim, todas as misturas analisadas obtiveram bons coeficientes de determinação. De acordo com a norma DNIT 183 (2018), o valor mínimo permitido para R^2 é 0,80, e todas as misturas atenderam a esse critério.

O valor de n_2 , que representa a inclinação das linhas na Figura 38 (a) ($N_f \times \Delta\sigma$), aumentou na seguinte ordem: 70%RAP(7%BO), 0%RAP(0%BO), 63%RAP(5%BO),

56%RAP(3%BO) e 15%RAP(0%BO). Quanto maior o valor de n_2 , maior a sensibilidade das misturas à variação de tensões. Assim, a mistura com 70% de RAP apresentou a menor sensibilidade à variação de tensões. Esse comportamento é vantajoso para a durabilidade em campo, considerando que rodovias estão constantemente sujeitas a variações de carga de veículos. Embora misturas com alto teor de RAP geralmente apresentem maior sensibilidade devido à maior rigidez, a adição de 7% de óleo de babaçu como agente rejuvenescedor foi eficaz em reduzir a rigidez e melhorar significativamente a resistência à fadiga dessa mistura. A mistura de referência 0%RAP(0%BO) também demonstrou baixa sensibilidade ao trincamento sob variações de tensões, o que se deve à maior tenacidade dessas misturas.

Tabela 28 - Parâmetros característicos das curvas de vida de fadiga das misturas asfálticas.

Mistura asfáltica	Equação	R ²	Coeficientes	
	$N \times \Delta\sigma$		K_2	n_2
0%RAP(0%BO)	$19737(\frac{1}{\Delta\sigma})^{4,167}$	0,9701	19737	4,167
	$6E-08(\frac{1}{\varepsilon_r})^{2,578}$	0,9417	6E-08	2,578
15%RAP(0%BO)	$6E+07(\frac{1}{\Delta\sigma})^{10,29}$	0,999	6E+07	10,29
	$1E-13(\frac{1}{\varepsilon_r})^{4,041}$	0,8607	1E-13	4,041
56%RAP(3%BO)	$4E+08(\frac{1}{\Delta\sigma})^{9,759}$	0,9921	4E+08	9,759
	$4E-08(\frac{1}{\varepsilon_r})^{2,675}$	0,9956	4E-08	2,675
63%RAP(5%BO)	$2E+07(\frac{1}{\Delta\sigma})^{7,371}$	0,9799	2E+07	7,371
	$3E-08(\frac{1}{\varepsilon_r})^{2,767}$	0,9456	3E-08	2,767
70%RAP(7%BO)	$300836(\frac{1}{\Delta\sigma})^{2,635}$	0,8298	300836	2,635
	$0,4322(\frac{1}{\varepsilon_r})^{1,209}$	0,8446	0,4322	1,209

Conforme ilustrado na Figura 38 (a), a resistência à fadiga por tração indireta das misturas asfálticas em ordem decrescente de desempenho foi: 70%RAP(7%BO), 63%RAP(5%BO), 15%RAP(0%BO), 56%RAP(3%BO) e 0%RAP(0%BO). Dessa forma, conclui-se que todas as formulações com RAP apresentaram desempenho superior à mistura de controle em termos de resistência à fadiga, com destaque para aquelas que incorporaram maiores teores de óleo de babaçu.

O valor de n_3 indica a inclinação das linhas na Figura 38 (b) ($N_f \times \epsilon_f$), sendo que a sequência de aumento desse valor para as misturas avaliadas foi: 70%RAP(7%BO), 0%RAP(0%BO), 56%RAP(3%BO), 63%RAP(5%BO) e 15%RAP(0%BO). Observa-se que as misturas com 0%RAP, 56%RAP e 63%RAP apresentaram valores de n_3 muito semelhantes, indicando comportamento equivalente. Quanto maior o valor de n_3 , maior é a sensibilidade das misturas à variação de deformação; assim, a mistura reciclada com 70% de RAP mostrou-se novamente a menos sensível a essas variações.

Mendes (2024) observou em seu estudo sobre resistência à fadiga por tração indireta de misturas asfálticas recicladas com 20% de RAP que essas misturas suportaram um maior número de ciclos em comparação à mistura asfáltica convencional em todos os níveis de tensão. No entanto, a autora verificou que a mistura reciclada apresentou valores mais elevados nos parâmetros n_2 e n_3 , sendo 11,31 e 4,575, respectivamente. Esses valores foram consideravelmente superiores aos da mistura de controle, que registrou 3,52 e 2,67, indicando que, embora a mistura convencional suporte menos ciclos, ela se mostrou menos sensível às variações de tensão e deformação. O aumento dos valores dos parâmetros para a mistura reciclada é atribuído à sua elevada rigidez e à ausência de um agente rejuvenescedor que pudesse minimizar esses efeitos. Santos (2005) aponta que misturas com maior rigidez tendem a apresentar, nos ensaios sob tensão controlada, uma maior vida de fadiga, representada por um maior número de ciclos. No entanto, é importante avaliar a suscetibilidade dessas misturas às variações de tensão e deformação.

Nesta pesquisa, a mistura asfáltica 70%RAP(7%BO) apresentou uma redução considerável nos parâmetros n_2 e n_3 em relação às demais misturas com alto teor de RAP (56% e 63%) por conta do uso de uma maior taxa de óleo de babaçu, chegando a se mostrar menos sensível que a mistura de controle (sem uso de RAP). Ademais, essa mistura conseguiu suportar maior número de ciclos em todos os níveis de tensão testados. Isso indica esta

mistura como a mais resistente à fadiga dentre todas testadas. Wang *et al.* (2018) destacam que a influência do RAP na vida de fadiga de misturas recicladas se deve à diversidade de fontes de material fresado e não depende apenas do projeto da mistura, mas também da estrutura global do pavimento.

Zhang *et al.* (2021) analisaram misturas asfálticas com 40% e 60% de RAP, utilizando um agente rejuvenescedor composto (óleo aromático + plastificante + agente antienvelhecimento, na proporção de 100:10:2) em teores de 10% e 12% em relação ao peso do ligante asfáltico. O estudo revelou que a mistura asfáltica tradicional apresentou a maior resistência à fadiga, seguida pelas misturas recicladas com 40% de RAP e 10% ou 12% de agente rejuvenescedor, enquanto as misturas com 60% de RAP e os mesmos teores de agente rejuvenescedor apresentaram o pior desempenho. Assim, pode-se concluir que o tipo de agente rejuvenescedor e as características químicas relacionadas ao envelhecimento do RAP influenciam diretamente o desempenho da mistura reciclada. Para misturas com mais de 50% de RAP, é necessário utilizar um ligante macio e um agente rejuvenescedor eficaz (Daryaei; Mansourkhaki, 2020).

De Medeiros Melo Neto *et al.* (2022) observaram que o valor de n_3 da mistura de controle foi inferior ao das misturas com 40% de RAP e ácido graxo da borra do óleo de soja nos teores de 3% e 5%, indicando que a mistura tradicional foi menos sensível à variação de deformação. No entanto, as misturas recicladas suportaram um maior número de ciclos em todos os níveis de tensão. Da Costa *et al.* (2024) observaram que, no comportamento de fadiga, a mistura reciclada com 33% de RAP e 10% de óleo de algodão suportou um maior número de ciclos em todos os níveis de tensão e apresentou um valor de n_3 inferior ao da mistura convencional, corroborando os achados deste estudo.

Carvalho (2022) também observou que as misturas recicladas com 70% de RAP e 2% de óleo de girassol apresentaram valores de n_2 e n_3 inferiores aos da mistura tradicional, mostrando-se menos sensíveis à variação de deformação. Rahman *et al.* (2022) indicaram que misturas com granulometrias mais finas demonstraram maior resistência à fissuração em comparação com misturas de granulometria mais grossa, devido às diferenças nos mecanismos de propagação das fissuras. Assim como observado neste estudo, em misturas mais finas, é provável que as trincas se propaguem através dos agregados, enquanto nas misturas mais grossas, a propagação ocorra pelo mastic. Dado que misturas com alto teor

de RAP tendem a ter granulometria mais fina, isso pode ter contribuído para o aumento da resistência à fadiga das misturas recicladas, em conjunto com o uso do agente rejuvenescedor (óleo de babaçu), que promoveu maior maleabilidade nas misturas estudadas.

A Figura 39 apresenta o gráfico de probabilidade normal com os valores de fadiga por tração indireta (FTI) para todos os níveis de tensão e para todas as misturas asfálticas. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,723, indicando que o modelo linear de distribuição normal explica 72,30% da variância. A Tabela 29 apresenta os dados estatísticos dos testes ANOVA e Tukey realizados com as amostras submetidas ao ensaio de fadiga por tração indireta para o nível de tensão de 40%.

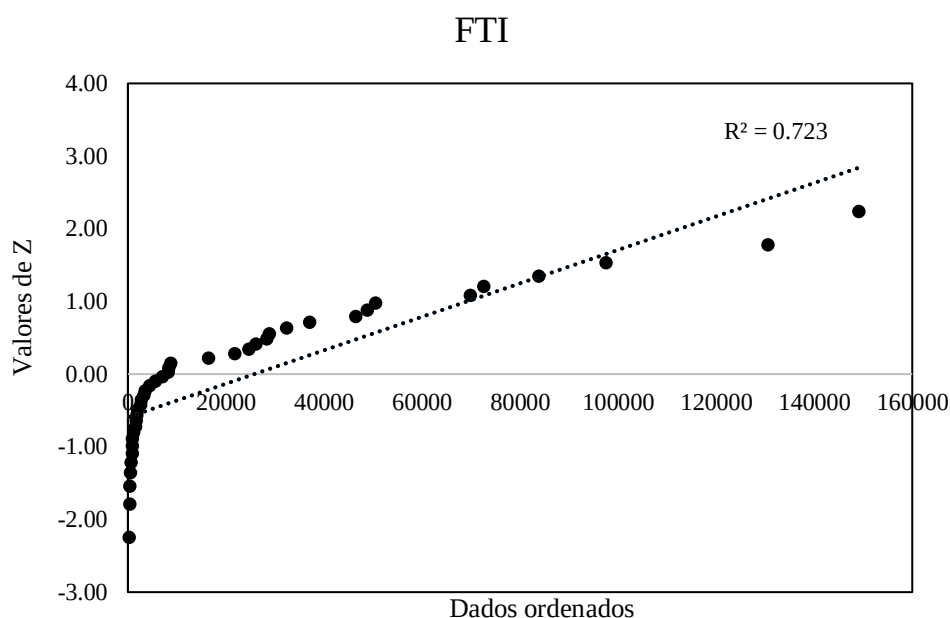


Figura 39 - Gráfico de probabilidade normal para o ensaio de fadiga por tração indireta.

Conforme observado na Tabela 29, o teste estatístico ANOVA indicou que não houve diferença estatisticamente significativa entre as médias das misturas no ensaio de fadiga com nível de tensão de 40%, uma vez que o p-valor obtido foi superior ao nível de significância de 5% (0,05). Além disso, as diferenças entre as médias foram inferiores à diferença mínima significativa (DMS). Dessa forma, as misturas asfálticas apresentaram vida de fadiga equivalente para esse nível de tensão.

Tabela 29 - Dados estatísticos do teste ANOVA para o ensaio de Fadiga para o nível de tensão de 40%.

ANOVA - Nível de tensão (40%)						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	p-valor	F crítico
Entre grupos	11945670044	4	2986417511	1.078138	0.455774	5.1921678
Dentro dos grupos	13849883768	5	2769976754			
Total	25795553812	9				
Tukey						
MQ dentro dos grupos			2769976753.6000			
q tabelado			5.6700			
DMS			172290.1677			
Módulo da diferença entre as médias						
0%RAP(0%BO) x 15%RAP(0%BO)			51860.0000			
0%RAP(0%BO) x 56%RAP(3%BO)			34305.0000			
0%RAP(0%BO) x 63%RAP(5%BO)			80183.0000			
0%RAP(0%BO) x 70%RAP(7%BO)			98542.5000			
15%RAP(0%BO) x 56%RAP(3%BO)			17555.0000			
15%RAP(3%BO) x 63%RAP(5%BO)			28323.0000			
15%RAP(0%BO) x 70%RAP(7%BO)			46682.5000			
56%RAP(3%BO) x 63%RAP(5%BO)			45878.0000			
56%RAP(3%BO) x 70%RAP(7%BO)			64237.5000			
63%RAP(5%BO) x 70%RAP(7%BO)			18359.5000			

DMS = diferença mínima significativa, gl = grau de liberdade, MQ = quadrados médios, SQ = soma dos quadrados.

O mesmo procedimento estatístico foi realizado para os demais níveis de tensão (45%, 50% e 55%), nos quais foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre as médias das misturas asfálticas quanto à vida de fadiga. Os p-valores determinados foram inferiores ao nível de significância de 5% (0,05), e o teste estatístico de Tukey permitiu verificar, par a par, quais misturas apresentaram diferenças significativas entre si. As Tabelas 30, 31 e 32 mostram os valores obtidos nos testes estatísticos para os níveis de tensão de 45%, 50% e 55%, respectivamente.

Tabela 30 - Dados estatísticos do teste ANOVA para o ensaio de Fadiga para o nível de tensão de 45%.

ANOVA - Nível de tensão (45%)						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	p-valor	F crítico
Entre grupos	7522071655	4	1880517914	17.82818	0.00367	5.192168
Dentro dos grupos	527400461	5	105480092.2			
Total	8049472116	9				
Tukey						
MQ dentro dos grupos			105480092.2000			
q tabelado			5.6700			
DMS			33620.7720			

Módulo da diferença entre as médias	
0%RAP(0%BO) x 15%RAP(0%BO)	15243.0000
0%RAP(0%BO) x 56%RAP(3%BO)	8847.5000
0%RAP(0%BO) x 63%RAP(5%BO)	30905.0000
0%RAP(0%BO) x 70%RAP(7%BO)	77500.5000*
15%RAP(0%BO) x 56%RAP(3%BO)	6395.5000
15%RAP(3%BO) x 63%RAP(5%BO)	15662.0000
15%RAP(0%BO) x 70%RAP(7%BO)	62257.5000*
56%RAP(3%BO) x 63%RAP(5%BO)	22057.5000
56%RAP(3%BO) x 70%RAP(7%BO)	68653.0000*
63%RAP(5%BO) x 70%RAP(7%BO)	46595.5000*

DMS = diferença mínima significativa, gl = grau de liberdade, MQ = quadrados médios, SQ = soma dos quadrados, * itálico = p-valor abaixo do nível de significância de 5% (0,05) e/ou valores acima da diferença mínima significativa (DMS).

Tabela 31 - Dados estatísticos do teste ANOVA para o ensaio de Fadiga para o nível de tensão de 50%.

ANOVA - Nível de tensão (50%)						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	p-valor	F crítico
Entre grupos	1711315440	4	427828860	5.793825	0.04055	5.192168
Dentro dos grupos	369211050	5	73842210			
Total	2080526490	9				
Tukey						
MQ dentro dos grupos			73842210.0000			
q tabelado			5.6700			
DMS			28130.3266			
Módulo da diferença entre as médias						
0%RAP(0%BO) x 15%RAP(0%BO)	3307.5000					
0%RAP(0%BO) x 56%RAP(3%BO)	787.5000					
0%RAP(0%BO) x 63%RAP(5%BO)	5782.5000					
0%RAP(0%BO) x 70%RAP(7%BO)	34777.5000*					
15%RAP(0%BO) x 56%RAP(3%BO)	2520.0000					
15%RAP(3%BO) x 63%RAP(5%BO)	2475.0000					
15%RAP(0%BO) x 70%RAP(7%BO)	31470.0000*					
56%RAP(3%BO) x 63%RAP(5%BO)	4995.0000					
56%RAP(3%BO) x 70%RAP(7%BO)	33990.0000*					
63%RAP(5%BO) x 70%RAP(7%BO)	28995.0000*					

DMS = diferença mínima significativa, gl = grau de liberdade, MQ = quadrados médios, SQ = soma dos quadrados, * itálico = p-valor abaixo do nível de significância de 5% (0,05) e/ou valores acima da diferença mínima significativa (DMS).

Tabela 32 - Dados estatísticos do teste ANOVA para o ensaio de Fadiga para o nível de tensão de 55%.

ANOVA - Nível de tensão (55%)						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	p-valor	F crítico
Entre grupos	3493784035	4	873446008.8	5.205382	0.04976	5.192168
Dentro dos grupos	838983537.5	5	167796707.5			
Total	4332767573	9				
Tukey						
MQ dentro dos grupos			167796707.5000			
q tabelado			5.6700			
DMS			42404.7150			
Módulo da diferença entre as médias						
0%RAP(0%BO) x 15%RAP(0%BO)			1612.5000			
0%RAP(0%BO) x 56%RAP(3%BO)			1505.0000			
0%RAP(0%BO) x 63%RAP(5%BO)			7950.0000			
0%RAP(0%BO) x 70%RAP(7%BO)			48992.5000*			
15%RAP(0%BO) x 56%RAP(3%BO)			107.5000			
15%RAP(3%BO) x 63%RAP(5%BO)			6337.5000			
15%RAP(0%BO) x 70%RAP(7%BO)			47380.0000*			
56%RAP(3%BO) x 63%RAP(5%BO)			6445.0000			
56%RAP(3%BO) x 70%RAP(7%BO)			47487.5000*			
63%RAP(5%BO) x 70%RAP(7%BO)			41042.5000			

DMS = diferença mínima significativa, gl = grau de liberdade, MQ = quadrados médios, SQ = soma dos quadrados, * itálico = p-valor abaixo do nível de significância de 5% (0,05) e/ou valores acima da diferença mínima significativa (DMS).

As Tabelas 30, 31 e 32 mostram que a mistura asfáltica reciclada 70%RAP(7%BO) apresentou uma diferença estatisticamente significativa em relação à vida de fadiga nos níveis de tensão de 45% e 50%, comparada a todas as demais misturas asfálticas. Esses resultados indicam que a mistura com 70% de RAP demonstrou a melhor resistência à fadiga, com um aumento de resistência significativamente superior às demais, destacando-se como a mais durável em relação ao trincamento.

No nível de tensão de 55%, a mistura asfáltica com 70% de RAP apresentou um comportamento de fadiga equivalente ao da mistura reciclada 63%RAP(5%BO), indicando que, em níveis de tensão mais elevados, as misturas recicladas com maior dosagem de agente rejuvenescedor apresentaram maior resistência.

Um dos principais desafios apontados na literatura (Saberi.K; Fakhri; Azami, 2017; Zhou *et al.*, 2019; Moniri *et al.*, 2021; Jiao *et al.*, 2022; Beserra Costa *et al.*, 2023a) em relação à adição de altos teores de RAP em misturas asfálticas é a suscetibilidade ao

trincamento por fadiga. Nesse contexto, a constatação do bom desempenho de misturas recicladas com até 70% de RAP e óleo de babaçu apresenta um caminho promissor para a aplicação de maiores quantidades de RAP nas rodovias brasileiras. Essa composição foi produzida em temperaturas de usinagem mais baixas, sem exigir um maior consumo de energia em comparação às misturas convencionais, sendo necessárias adaptações no *layout* da usina para que o RAP seja aquecido à mesma temperatura dos agregados convencionais.

A produção de misturas asfálticas recicladas com 70% de RAP no Brasil enfrenta desafios operacionais, principalmente devido à variabilidade do material fresado, às limitações tecnológicas das usinas e às restrições normativas. A obtenção de RAP com propriedades homogêneas é uma etapa crítica, considerando as diferenças no envelhecimento do ligante e na composição dos agregados. Além disso, a maioria das usinas não dispõe de equipamentos adequados para o processamento de altas taxas de material reciclado, o que pode comprometer a qualidade da mistura e exigir ajustes no processo de aquecimento e mistura. Adicionalmente, as especificações normativas limitam a aplicação de elevados teores de RAP em obras públicas, enquanto o controle rigoroso dos parâmetros de dosagem, compactação e desempenho mecânico exige maior investimento em infraestrutura laboratorial e ajustes na produção. Assim, a implementação dessa tecnologia demanda avanços regulatórios e estruturais para viabilizar sua adoção em larga escala no país.

4.3.1.6. *DESGASTE CÂNTABRO*

A Figura 40 apresenta os valores médios de perda de massa das amostras de misturas asfálticas submetidas ao ensaio de desgaste por abrasão cântabro. As misturas asfálticas recicladas com maiores teores de RAP e maior proporção de agente rejuvenescedor – 63%RAP(5%BO) e 70%RAP(7%BO) – apresentaram as menores perdas de massa. Esse comportamento pode estar relacionado à melhor adesividade do ligante aos agregados e à maior quantidade efetiva de ligante nas misturas, considerando que misturas com maiores teores de RAP tendem a liberar mais ligante asfáltico, dependendo do tipo de agente rejuvenescedor utilizado. Como o teor de ligante virgem determinado para o projeto foi de 3,5% nas misturas com 56%, 63% e 70% de RAP, aquelas com maior teor de RAP e agente rejuvenescedor demonstraram melhor desempenho frente ao desgaste.

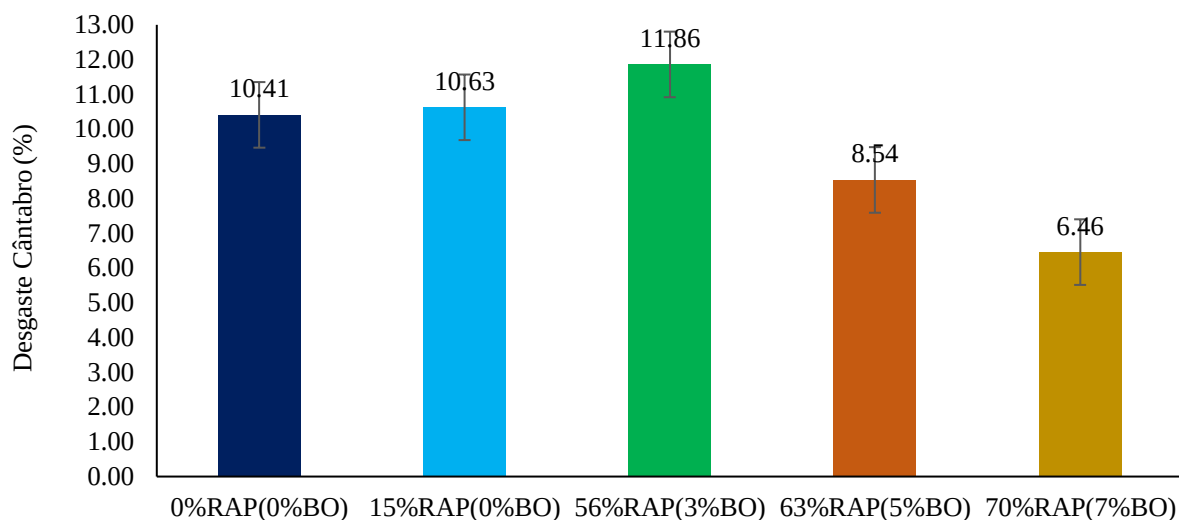


Figura 40 – Perda de massa das misturas asfálticas por desgaste cântabro.

A perda de massa das misturas com 15% e 56% de RAP em relação à mistura de controle foi mínima, registrando aumentos de 2,12% e 13,93%, respectivamente. Em contraste, as misturas com 63% e 70% de RAP mostraram reduções de 18,35% e 37,95% na perda de massa, indicando menor suscetibilidade ao desgaste superficial causado pelo atrito pneu-pavimento em rodovias pavimentadas. Esse comportamento está alinhado ao observado no ensaio de resistência ao dano por umidade induzida, como evidenciado na Figura 41, que mostra uma correlação entre esses parâmetros. Assim, o aumento da resistência ao dano por umidade induzida resultou em menor perda por abrasão nas misturas asfálticas.

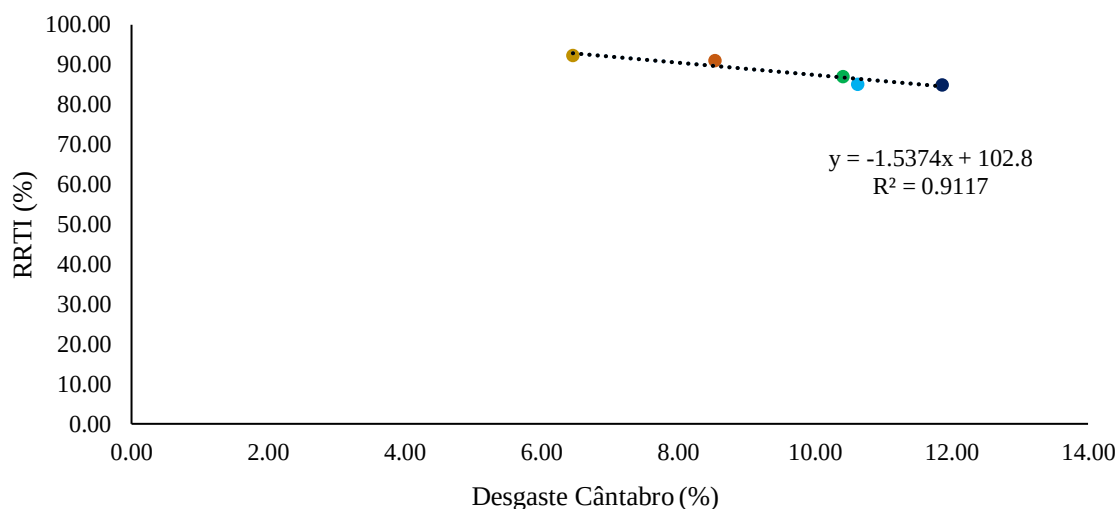


Figura 41 - Correlação entre RRTI e Desgaste Cântabro das misturas asfálticas.

Mendes (2024) observou um aumento de 21,52% na perda de massa por desgaste cântabro em misturas recicladas com 20% de RAP, em comparação a uma mistura convencional (sem RAP). Centofante *et al.* (2018) apontam que misturas recicladas com maiores teores de RAP tendem a apresentar maior suscetibilidade ao desgaste por atrito. No entanto, essa tendência não pode ser considerada uma verdade absoluta, já que os efeitos do agente rejuvenescedor influenciam significativamente o desempenho em termos de rigidez, fadiga, resistência à umidade e desgaste das misturas recicladas.

Da Costa *et al.* (2024) avaliaram misturas recicladas contendo 15%, 25% e 33% de RAP e 4%, 6% e 10% de óleo de algodão como agente rejuvenescedor, respectivamente. Os autores observaram a mesma tendência verificada neste estudo: as misturas recicladas com agente rejuvenescedor apresentaram menor perda de massa, com reduções de 51,30%, 44,04% e 33,36%, respectivamente, em comparação à mistura convencional. Cerdeira (2018) destaca que a incorporação de aditivos como surfactantes, modificadores e agentes rejuvenescedores em misturas asfálticas recicladas contribui para a redução da perda de massa em relação às misturas sem incorporação de RAP.

Dias (2024) observou um aumento na perda de massa por desgaste ao adicionar 15% de RAP à mistura asfáltica, utilizando diferentes métodos de produção. A mistura produzida com o RAP à mesma temperatura dos agregados convencionais apresentou um aumento de 33,62% na perda de massa, enquanto esse valor atingiu 62,15% quando o RAP foi utilizado à temperatura ambiente (27°C). Esses resultados corroboram a ideia de que misturas recicladas que ativam maior quantidade de ligante apresentam melhor desempenho quanto à perda de massa.

A Figura 42 apresenta o gráfico de probabilidade normal com os valores de perda de massa por desgaste cântabro (%D) para todos os tipos de misturas asfálticas avaliadas. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,9079, indicando fortemente (90,79%) que o modelo linear de distribuição normal explica a variância dos dados. A Tabela 33 apresenta os dados estatísticos dos testes ANOVA e Tukey realizados com as amostras asfálticas submetidas ao ensaio.

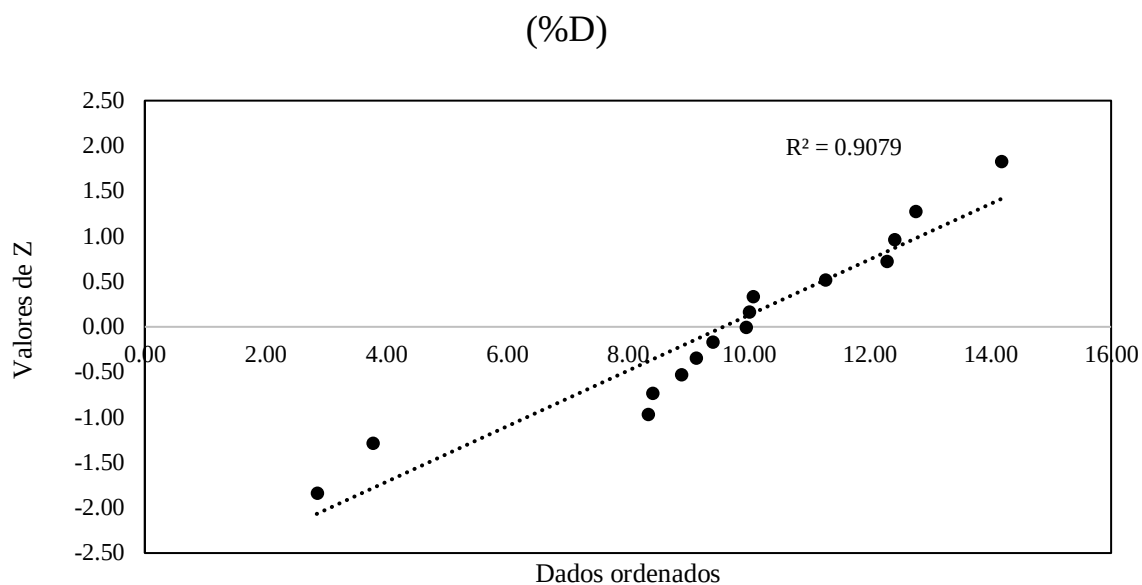


Figura 42 - Gráfico de probabilidade normal para o ensaio de Desgaste Cântabro.

Tabela 33 -Dados estatísticos do teste ANOVA para o ensaio de Desgaste Cântabro.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	p-valor	F crítico
Entre grupos	53.43197175	4	13.35799294	1.686014919	0.228991928	3.478049691
Dentro dos grupos	79.2282013	10	7.92282013			
Total	132.660173	14				
Tukey						
MQ dentro dos grupos				7.9228		
q tabelado				4.6500		
DMS				7.5567		
Módulo da diferença entre as médias						
0%RAP(0%BO) x 15%RAP(0%BO)				0.2173		
0%RAP(0%BO) x 56%RAP(3%BO)				1.4521		
0%RAP(0%BO) x 63%RAP(5%BO)				1.8727		
0%RAP(0%BO) x 70%RAP(7%BO)				3.9492		
15%RAP(0%BO) x 56%RAP(3%BO)				1.2348		
15%RAP(3%BO) x 63%RAP(5%BO)				2.0900		
15%RAP(0%BO) x 70%RAP(7%BO)				4.1666		
56%RAP(3%BO) x 63%RAP(5%BO)				3.3248		
56%RAP(3%BO) x 70%RAP(7%BO)				5.4013		
63%RAP(5%BO) x 70%RAP(7%BO)				2.0765		

DMS = diferença mínima significativa, gl = grau de liberdade, MQ = quadrados médios, SQ = soma dos quadrados.

Conforme apresentado na Tabela 33, o teste estatístico ANOVA indicou que não há diferença significativa entre as médias dos valores de perda de massa por abrasão nas misturas asfálticas avaliadas. O p-valor obtido no teste foi superior ao nível de significância de 5% (0,05), confirmando a ausência de significância na variabilidade dos dados. O valor de F calculado foi inferior ao F crítico, indicando que a variabilidade entre as médias dos grupos não é estatisticamente diferente. Isso foi corroborado pela análise do módulo da diferença entre as médias, par a par, onde todos os valores foram inferiores à diferença mínima significativa (DMS), indicando que não houve diferença entre as médias das misturas avaliadas. Assim, as misturas asfálticas recicladas, com baixo teor de RAP (15%) e altos teores de RAP (56%, 63% e 70%), apresentaram resistência ao desgaste por abrasão equivalente à da mistura convencional, demonstrando que a adição de RAP não prejudicou a perda de massa devido ao atrito.

4.3.1.7. ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO MECÂNICO DAS MISTURAS RECICLADAS

A Tabela 34 apresenta um resumo dos ganhos, equivalências e perdas no desempenho mecânico das misturas asfálticas recicladas com óleo de babaçu em comparação à mistura de controle (0% RAP e 0% óleo de babaçu – 0%RAP(0%BO)), com base nos dados obtidos e nos testes estatísticos aplicados.

Tabela 34 - Análise comparativa de desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas com óleo de babaçu e mistura asfáltica de controle.

Misturas Asfálticas	RTI	RRTI	MR	FN	FTI (40%)	FTI (45%)	FTI (50%)	FTI (55%)	Desgaste Cântabro
0%RAP (0%BO)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15%RAP (0%BO)	Equiv.	Equiv.	Equiv.	Equiv.	Equiv.	Equiv.	Equiv.	Equiv.	Equiv.
56%RAP (3%BO)	Sup.	Equiv.	Sup.	Equiv.	Equiv.	Equiv.	Equiv.	Equiv.	Equiv.
63%RAP (5%BO)	Equiv.	Equiv.	Sup.	Equiv.	Equiv.	Equiv.	Equiv.	Equiv.	Equiv.
70%RAP (7%BO)	Equiv.	Equiv.	Equiv.	Equiv.	Equiv.	Sup.	Sup.	Sup.	Equiv.

Nota: RTI: Resistência à Tração Indireta, RRTI: Resistência Retida à Tração Indireta, MR: Módulo de Resiliência, FN: Flow Number, FTI: Fadiga por Tração Indireta, Equiv.: Equivalente, Sup.: Superior.

A análise apresentada na Tabela 34 indica que a mistura asfáltica reciclada com 15% de RAP exibiu desempenho equivalente em todos os ensaios realizados em relação à mistura de controle, evidenciando que a incorporação de baixos teores de RAP (<30%) não compromete as propriedades mecânicas das misturas asfálticas (de Medeiros Melo Neto *et al.*, 2022; Beserra Costa *et al.*, 2023a). A mistura contendo 56% de RAP e 3% de óleo de babaçu (BO) demonstrou maior rigidez, com desempenho superior nos ensaios de resistência à tração indireta e módulo de resiliência, ambos parâmetros de rigidez da mistura. Com o aumento do teor de óleo de babaçu, mesmo associado a maiores porcentagens de RAP, observou-se um efeito predominante de amolecimento/rejuvenescimento do ligante envelhecido. Nesse contexto, a mistura com 63% de RAP e 5% de BO apresentou comportamento semelhante à mistura de controle em todos os ensaios, exceto no módulo de resiliência, indicando que esse teor de rejuvenescedor ainda não foi suficiente para reduzir a rigidez ao mesmo nível da referência. Entretanto, a adição de 7% de óleo de babaçu, mesmo com 70% de RAP, resultou em desempenho mecânico equivalente ao da mistura de controle em todos os ensaios, com destaque para o ensaio de fadiga por tração indireta, no qual foram observados ganhos de desempenho em altos níveis de tensão (45%, 50% e 55%). Esses resultados indicam que essa composição proporcionou maior flexibilidade à mistura asfáltica.

4.3.2. DIMENSIONAMENTO DA CAMADA DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO

Para avaliar os efeitos da incorporação de RAP e do agente rejuvenescedor (óleo de babaçu) no dimensionamento da camada de revestimento asfáltico em um pavimento flexível padrão, adotou-se o método MeDiNa. No software, foram consideradas camadas fixas de base, sub-base e subleito para os cinco cenários analisados: pavimento flexível com mistura convencional na camada de rolamento e pavimentos com misturas contendo 15%RAP(0%BO), 56%RAP(3%BO), 63%RAP(5%BO) e 70%RAP(7%BO) como camada de rolamento nos cenários de 2 a 5, respectivamente. No Brasil, o uso de altos teores de RAP (>50%) não é amplamente recomendado devido à variabilidade do material fresado, às limitações tecnológicas das usinas e às diferenças no envelhecimento do ligante e na composição dos agregados. No entanto, considerando o bom desempenho mecânico demonstrado na Seção 4.3.1 e visando uma análise comparativa, optou-se por incluir no

estudo todas as configurações de misturas recicladas. A Figura 43 apresenta a estrutura do pavimento flexível utilizada na análise de dimensionamento no software MeDiNa.

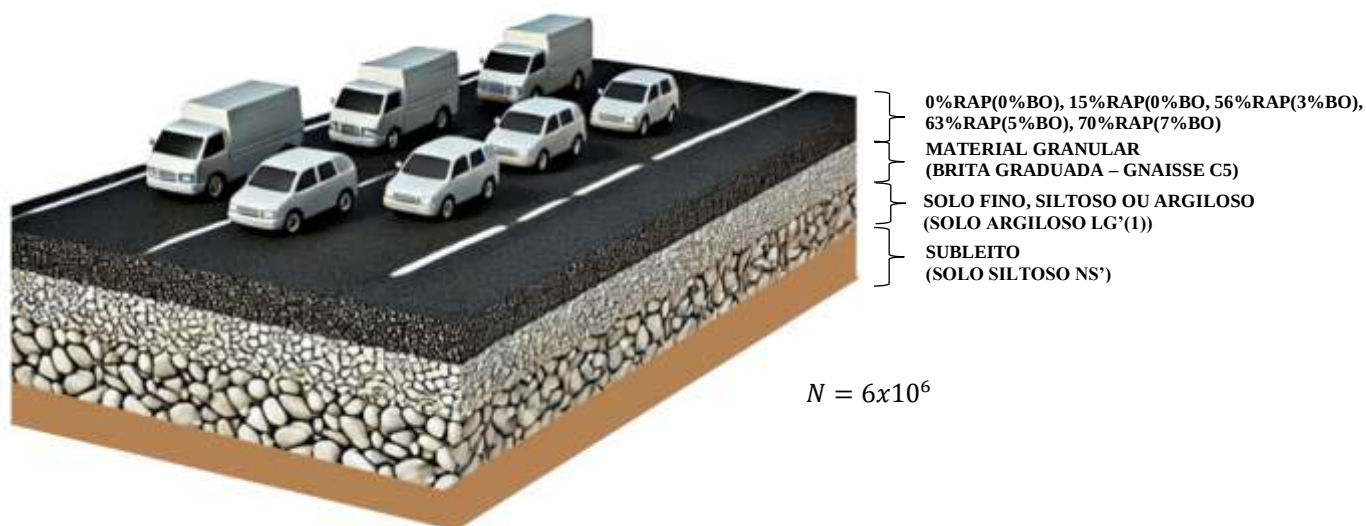


Figura 43 - Pavimento padrão utilizado no dimensionamento pelo software MeDiNa.

A Tabela 35 apresenta os dados de tráfego de projeto simulados no software MeDiNa. O valor de N igual a 6×10^6 foi definido com base no nível de tráfego da dosagem asfáltica SUPERPAVE (médio a alto), que corresponde a valores de N entre 10^6 e 10^7 . A taxa de crescimento da frota de veículos considerada no dimensionamento foi de 4%, em virtude de um aumento médio de 3,6% na frota nacional entre dezembro de 2022 e dezembro de 2023 (Balcão Automotivo, 2024). O nível de confiabilidade adotado para os dados dimensionados no software foi de 95% (Franco; Motta, 2020a).

Tabela 35 - Dados do tráfego do dimensionamento MeDiNa.

Dados do Tráfego Simulado	
Tipo de Via	Sistema Arterial Principal
VMD	1370,00
FV	1,00
N anual (1º ano)	5,00E+05
% Veículos na faixa de projeto	100,00
N anual da faixa	5,00E+05
Taxa de crescimento (%)	4,00
Período de projeto (anos)	10,00
N total	6,00E+06
Nível de confiabilidade (%)	95,00

FV = fator de veículo, N = nível de tráfego, VMD = volume médio diário.

A Tabela 36 apresenta todos os dados de entrada das 5 misturas asfálticas utilizadas no dimensionamento, mantidas as camadas subjacentes invariáveis (base, sub-base e subleito). O desempenho mecânico quanto à tração indireta, módulo de resiliência e fadiga por tração indireta influencia no processo da determinação das espessuras das camadas. O Fator de Fadiga da Mistura (FFM) é calculado pelo software por meio da Equação 10 apresentada anteriormente, e está apresentado para cada tipo de mistura asfáltica avaliada.

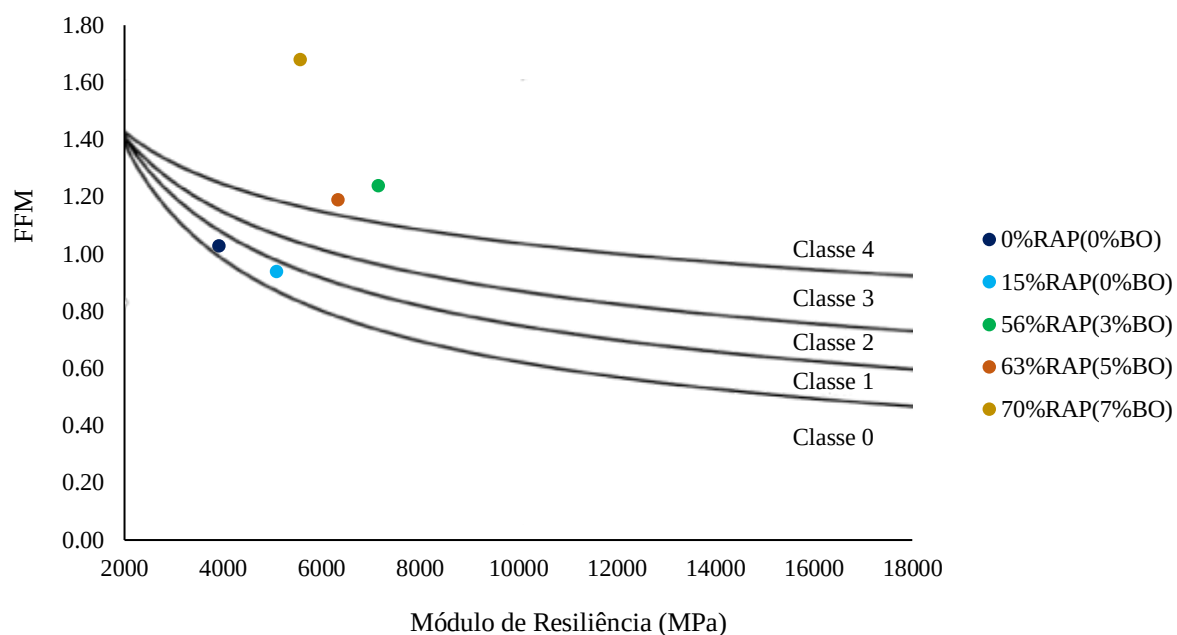
Tabela 36 - Dados de entrada do software MeDiNa para todos os tipos de misturas asfálticas analisadas e as camadas de base e sub-base consideradas no software.

Dados de entrada	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Brita Graduada – Gnaiss C5 (Base)	Solo Argiloso LG*(1) (Sub-base)	Solo Siltoso NS* (Subleito)
Coeficiente de Poisson	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,35	0,45	0,45
Módulo de Resiliência (MPa)	3908,00	5073,00	7143,00	6317,00	5557,00	381	250	189
Tipo de CAP	CAP 50/70	CAP 50/70	CAP 50/70 + 3%BO	CAP 50/70 + 5%BO	CAP 50/70 + 7%BO	NA	NA	NA
Gmm (g/cm³)	2,48	2,46	2,42	2,42	2,42	NA	NA	NA
Resistência à Tração Indireta (MPa)	1,14	1,28	1,65	1,35	1,15	NA	NA	NA
Teor de asfalto (%)	4,75	4,50	3,50	3,50	3,50	NA	NA	NA
Volume de vazios (%)	4,05	4,12	3,90	3,94	4,08	NA	NA	NA
Faixa granulométrica	Faixa C	Faixa C	Faixa C	Faixa C	Faixa C	NA	NA	NA
Abrasão Los Angeles (%)	20,94	20,94	20,94	20,94	20,94	43,00	NA	NA
Norma ou especificação	(DNIT 031, 2006)	(DNIT 031, 2006)	(DNIT 031, 2006)	(DNIT 031, 2006)	(DNIT 031, 2006)	(DNIT 141, 2022)	(DNIT 139, 2010)	(DNIT 137, 2010)
Coeficiente de regressão (k1)	6,00E-08	1,00E-13	4,00E-08	3,00E-08	4,32E-01	NA	NA	NA
Coeficiente de regressão (k2)	-2,578	-4,041	-2,767	-2,767	-1,209	NA	NA	NA
Classe de Fadiga	1,00	1,00	4,00	4,00	4,00	NA	NA	NA
FFM (100μ a 250μ)	1,03	0,94	1,24	1,19	1,68	NA	NA	NA
Massa específica (g/cm³)	NA	NA	NA	NA	NA	2,22	1,66	1,80
Umidade Ótima (%)	NA	NA	NA	NA	NA	5,00	24,00	13,00
Energia de Compactação	NA	NA	NA	NA	NA	Modificada	Normal	Normal
Coeficiente de Regressão (k3)	NA	NA	NA	NA	NA	0,0868	0,206	0,244
Coeficiente de Regressão (k4)	NA	NA	NA	NA	NA	-0,2801	-0,24	0,419
Coeficiente de Regressão (k5)	NA	NA	NA	NA	NA	0,8929	1,34	1,309
Coeficiente de Regressão (k6)	NA	NA	NA	NA	NA	0,0961	0,038	0,069

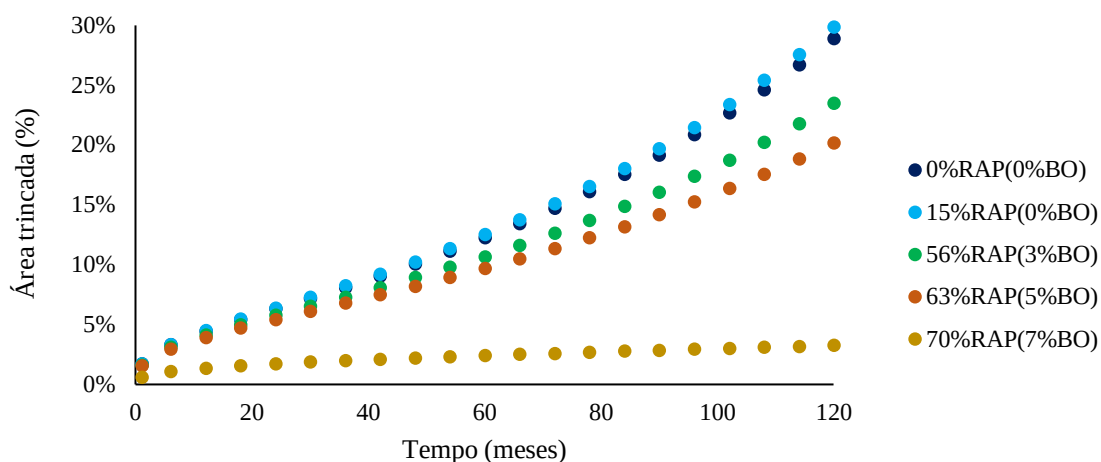
Nota: CAP: cimento asfáltico de petróleo, FFM: fator de fadiga da mistura, Gmm: Massa específica da mistura asfáltica solta, NA: não aplicável.

Conforme indicado na Tabela 36, o coeficiente de *Poisson* adotado foi de 0,30, valor recomendado pelo manual de dimensionamento devido às características específicas do concreto asfáltico (Franco; Motta, 2020a). O valor de *Abrasão Los Angeles* (20,94) foi determinado pela média dos resultados obtidos nos ensaios com britas de 19 mm e 12,5 mm, ambas empregadas na composição das misturas asfálticas. As misturas recicladas com altos teores de RAP (56%, 63% e 70%) e agente rejuvenescedor (óleo de babaçu) apresentaram os maiores valores de FFM, sugerindo melhor desempenho à fadiga por tração indireta. Esse resultado está em consonância com as classes de fadiga atribuídas, sendo classe 4 para essas misturas, enquanto a mistura convencional 0%RAP(0%BO) e 15%RAP(0%BO) foram classificadas como classe 1. A classificação de fadiga varia de 0 a 4, sendo as misturas mais resistentes à fadiga classificadas na classe 4, enquanto as menos resistentes são enquadradas na classe 0. A Figura 44 (a) ilustra a classificação das misturas asfálticas nas diferentes classes de fadiga, a Figura 44 (b) apresenta o desempenho em termos de área trincada ao longo da vida útil do pavimento (10 anos), e a Figura 44 (c) demonstra o desempenho em relação ao afundamento de trilha de roda ao longo do mesmo período.

(a)



(b)



(c)

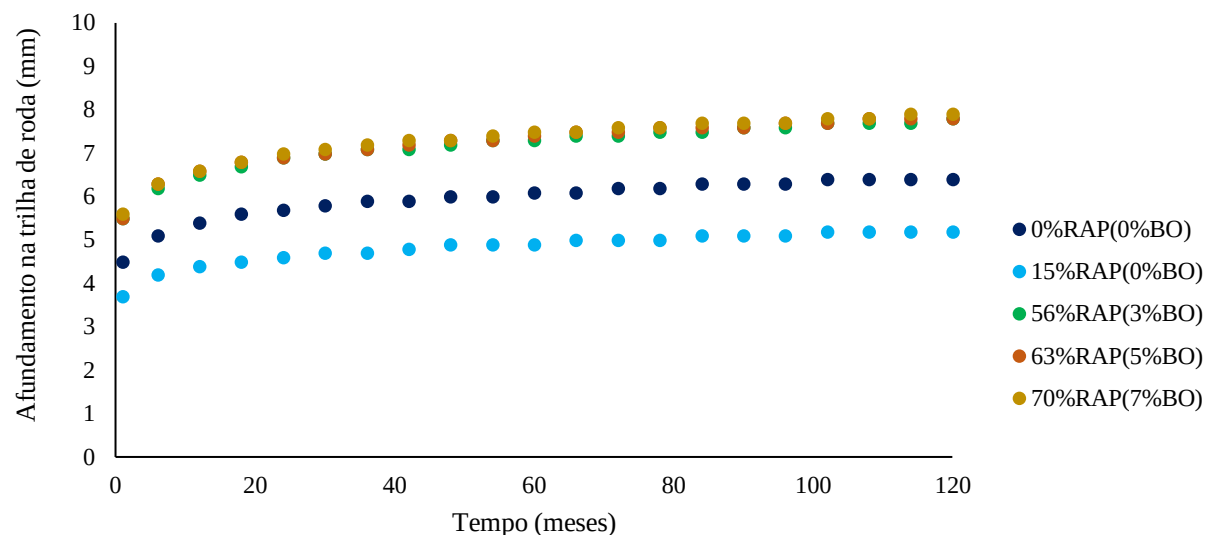


Figura 44 - Dados da análise mecanicista do software MeDiNa: (a) classes de fadiga, (b) % de área trincada, (c) afundamento na trilha de roda (mm).

Conforme ilustrado na Figura 44, as misturas asfálticas recicladas 70%RAP(7%BO), 63%RAP(5%BO) e 56%RAP(3%BO) apresentaram o melhor desempenho mecanicista. Essas misturas foram classificadas na maior classe de fadiga 4, exibiram menores porcentagens de área trincada ao longo da vida útil de projeto e maior afundamento na trilha de roda, o que indica um maior aproveitamento da camada até o fim de sua vida útil. Os valores limites para a porcentagem de área trincada são de 30%, e para o afundamento na trilha de roda, 10 mm,

considerando vias de sistema arterial principal (Franco; Motta, 2020a). Assim, todas as misturas asfálticas analisadas se mostraram viáveis para aplicação em campo. Para garantir que essas misturas mantenham o bom desempenho ao longo da vida útil do pavimento, foi determinada a espessura necessária para cada tipo de mistura, considerando camadas subjacentes constantes. A Figura 45 apresenta as espessuras das camadas do pavimento para cada tipo de mistura.

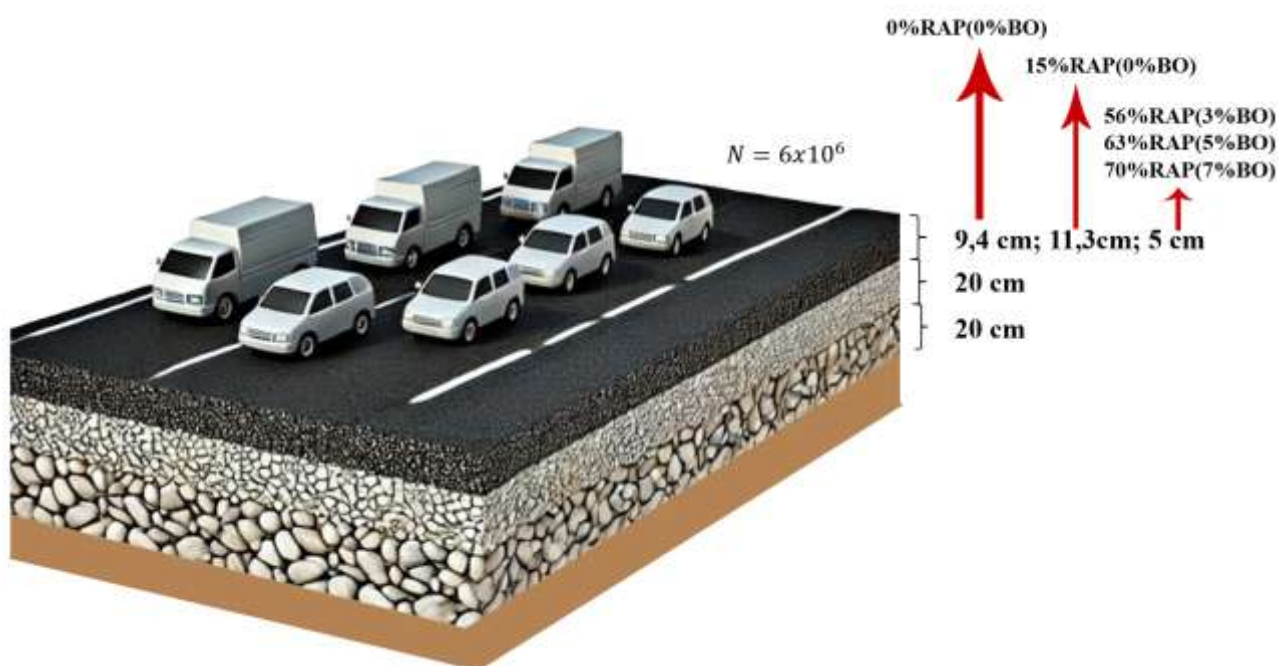


Figura 45 - Espessuras das camadas do pavimento flexível considerando a variabilidade das misturas asfálticas.

Na Figura 45 observa-se que a mistura asfáltica que exigiu maior espessura na camada de revestimento foi a 15%RAP(0%BO), seguida pela mistura asfáltica convencional 0%RAP(0%BO) e, por último, pelas misturas asfálticas com altos teores de RAP (56%, 63% e 70%) e agente rejuvenescedor. As espessuras obtidas para as misturas 0%RAP(0%BO) e 15%RAP(0%BO) foram bastante semelhantes, sendo 9,4 cm e 11,3 cm, respectivamente. Esse resultado é explicado pela classificação de ambas as misturas na mesma classe de fadiga 1 (Figura 44 (a)), indicando comportamento equivalente quanto à fadiga.

As misturas 56%RAP(3%BO), 63%RAP(5%BO) e 70%RAP(7%BO) apresentaram espessura mínima de 5 cm, devido ao desempenho em relação à fadiga, sendo classificadas na classe de fadiga 4 e registrando os maiores valores de FFM. Esses resultados são satisfatórios,

uma vez que essas misturas contêm quantidades elevadas de RAP e baixo teor de ligante asfáltico, o que resulta em uma redução no consumo de materiais virgens (agregados e ligante asfáltico) na produção da mistura asfáltica. Portanto, misturas com menor proporção de materiais virgens e que exigem menor espessura na construção de rodovias tendem a reduzir os custos de produção, viabilizando ainda mais sua aplicação.

Mendes (2024) observou em seu estudo que a mistura asfáltica reciclada com 20% de RAP apresentou um FFM de 0,87, enquanto a mistura de referência alcançou 1,06. Esses resultados corroboram com os dados obtidos nesta pesquisa, na qual a mistura de referência apresentou FFM de 1,03 e a mistura com 15% de RAP registrou 0,94. Lopes (2023) também relatou um valor de FFM para a mistura convencional de 1,013, próximo ao valor obtido neste estudo.

De Medeiros Melo Neto *et al.* (2024) avaliaram a influência de aditivos sustentáveis no dimensionamento de pavimentos flexíveis. Os autores analisaram misturas contendo aditivos como agente rejuvenescedor encapsulado, RAP, óleos vegetais, ceras e misturas do tipo Stone Matrix Asphalt (SMA). As misturas asfálticas com óleos encapsulados e óleos como modificadores do ligante 50/70 apresentaram redução na resistência à fadiga, enquadrando-se nas classes de fadiga 0 e 1, com FFM abaixo de 1,0. Por outro lado, misturas asfálticas recicladas com teores variados de RAP e agentes rejuvenescedores à base de óleo vegetal proporcionaram maior vida útil à fadiga (classes de fadiga 3 e 4) e valores de FFM superiores a 1,0, assim como as misturas do tipo SMA. Essas descobertas corroboram os dados obtidos nesta pesquisa, onde as misturas asfálticas recicladas rejuvenescidas com óleo de babaçu, mesmo com altos teores de RAP, demonstraram melhor desempenho à fadiga e exigiram menores espessuras de camada de revestimento. No entanto, no estudo de De Medeiros Melo Neto *et al.* (2024), as espessuras de todas as misturas asfálticas ficaram em torno de 30 cm, valor significativamente superior ao encontrado neste estudo.

A fim de avaliar a influência das espessuras das camadas de revestimento das misturas asfálticas recicladas na estrutura do pavimento flexível, considerando as camadas fixas de base, sub-base e subleito, utilizou-se o *software* de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), uma extensão do MeDiNa. Esse *software*, baseado em elementos finitos, permite o cálculo preciso de tensões, deformações e deslocamentos em diversos pontos selecionados na estrutura do pavimento.

A solução computacional do AEMC baseia-se em hipóteses de elasticidade linear para sistemas multicamadas contínuas, assumindo materiais elásticos, isotrópicos e homogêneos, com comportamento regido pela lei de *Hooke*. As camadas possuem espessura finita, exceto a inferior, considerada semi-infinita, e são ilimitadas horizontalmente. A superfície superior não sofre tensões externas, e a carga aplicada é estática e uniformemente distribuída. As tensões e deformações são nulas em grandes profundidades, e a aderência entre camadas pode variar de total a inexistente (Franco; Motta, 2020).

Na modelagem computacional, adotou-se um carregamento de eixo padrão rodoviário, considerando quatro rodas, carga de eixo de 8,2 toneladas, carga por roda de 2,05 toneladas e pressão de pneus de 0,56 MPa. Foram inseridos os dados das espessuras das camadas, massa específica, módulo de resiliência e coeficiente de *Poisson*. O comportamento do material foi assumido como linear, com ausência de aderência entre as camadas. A Figura 46 apresenta os pontos analisados: sob a roda do veículo ($x = 0$ cm) e entre as rodas ($x = 16,20$ cm).

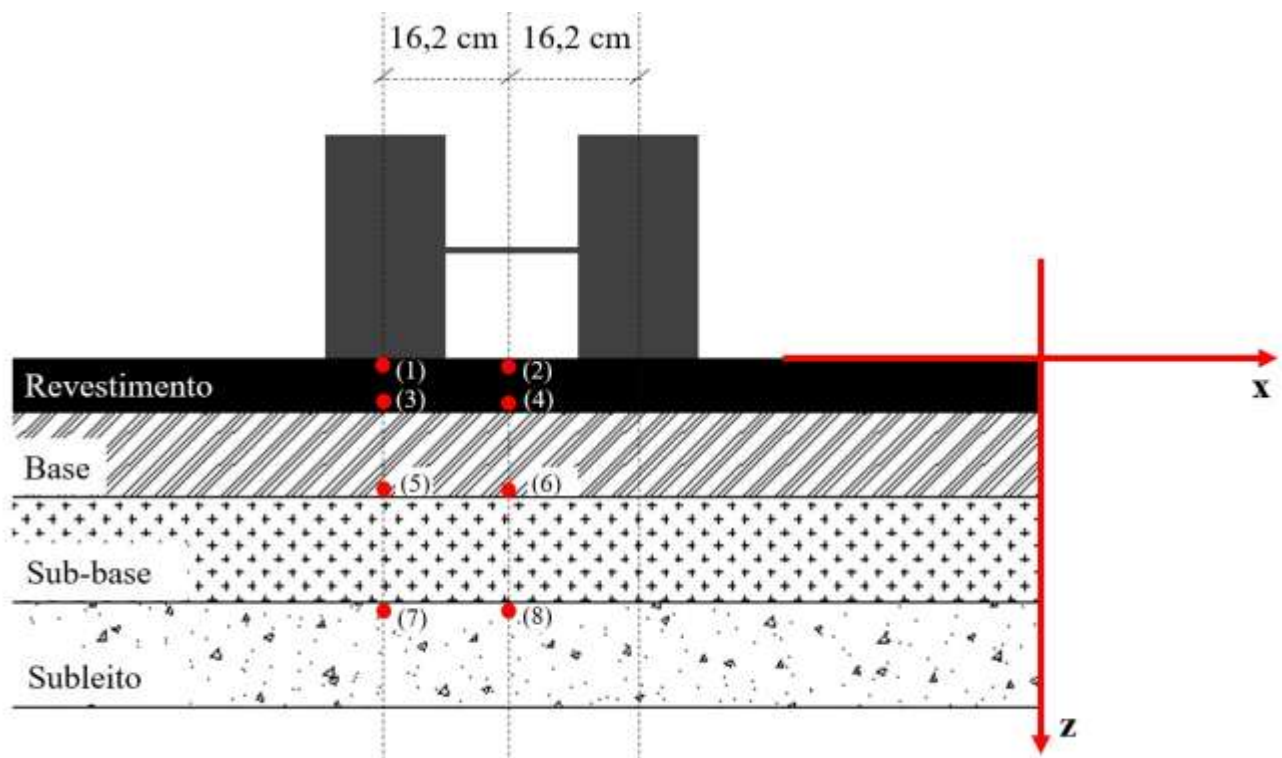


Figura 46 - Definição dos pontos avaliados na análise AEMC do pavimento.

A modelagem no AEMC permitiu determinar o número máximo de repetições de carga (N) com base nos deslocamentos sob a roda ($x = 0$ cm) e entre as rodas ($x = 16,2$ cm), considerando a fadiga do revestimento asfáltico. Na análise mecanicista da estrutura do pavimento, são empregados modelos experimentais de fadiga dos materiais, conforme estabelecido no documento Projeto de Pavimentação do Departamento de Estradas e Rodagem (2006).

Para a verificação mecanicista da estrutura do pavimento, considerando a variabilidade do tipo de revestimento asfáltico, foram utilizadas as Equações de fadiga 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 18, correspondentes às metodologias do *Asphalt Institute* (1976), FHWA (*Federal Highway Administration*, 1976), Pinto e Preussler (1980), modelo de fadiga da mistura obtido no ensaio de fadiga por tração indireta (FTI), Pinto (1991), Franco (2007) e Priest (2005), respectivamente.

$$N = 2,961 \times 10^{-5} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,291} \quad (11)$$

$$N = 1,092 \times 10^{-6} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,512} \quad (12)$$

$$N = 2,85 \times 10^{-7} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,69} \quad (13)$$

$$N = K \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^n \times 10^4 \quad (14)$$

$$N = 9,07 \times 10^{-9} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{2,65} \times \left(\frac{1}{M_R}\right)^{-0,033} \quad (15)$$

$$N = 1,904 \times 10^{-6} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{2,821} \times \left(\frac{1}{M_R}\right)^{0,74} \quad (16)$$

$$N = 0,4875 \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,0312} \times \left(\frac{1}{E}\right)^{0,6529}, \text{ (espessuras menores que 12,7 cm)} \quad (17)$$

$$N = 0,4801 \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,143} \times \left(\frac{1}{E}\right)^{0,4834}, \text{ (espessuras entre 18 e 23 cm)} \quad (18)$$

Onde:

N = número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

ε_t = deformação específica horizontal na tração;

E = rigidez de mistura (MPa);

M_R = módulo de resiliência (kgf/cm² na Equação 15 e MPa na Equação 16);

K = coeficiente correspondente a cada mistura asfáltica obtido no ensaio de FTI;

n = coeficiente correspondente a cada mistura asfáltica obtido no ensaio de FTI.

As deformações horizontais de tração (ε_t) nas fibras inferiores das camadas asfálticas, resultantes dos carregamentos aplicados na superfície do pavimento, podem levar à sua ruptura por fadiga caso sejam excessivas. Se o número N calculado for superior ao previsto no projeto, infere-se que o deslocamento crítico não será atingido antes desse limite. No entanto, caso contrário, a camada de revestimento asfáltico estará subdimensionada, resultando no surgimento de deslocamentos sob níveis de tráfego inferiores aos projetados, o que compromete a estrutura do pavimento e o torna suscetível ao trincamento por tração.

A Equação 11 do *Asphalt Institute* (1976) e FHWA (1976) foram determinadas considerando valores médios para a mistura asfáltica de módulo resiliente de 3000 MPa e volume de vazios de 4% (Equações 11 e 12). Pinto e Preussler (1980) foram os primeiros a desenvolver um modelo para estimar a fadiga de misturas asfálticas em laboratório. Para isso, realizaram ensaios de FTI, determinando o número de ciclos necessários até a ruptura completa da amostra. Os testes foram conduzidos em diferentes condições com misturas asfálticas produzidas com CAP 50/70 (Equação 13).

Pinto (1991) desenvolveu um modelo para prever a vida de fadiga de misturas asfálticas, fundamentado em ensaios de FTI a 25°C. O modelo, baseado na deformação de tração e no módulo de resiliência, foi aplicado a seis composições distintas de misturas asfálticas, conforme expresso na Equação (15). A calibração foi realizada a partir de observações experimentais e análises do desempenho em campo de segmentos da rodovia BR-101, permitindo a determinação de um fator de correlação entre laboratório e campo

(FLC) de 10^4 . Esse fator, correspondente a aproximadamente 20% da área trincada do pavimento sob temperatura de 54°C, ainda é amplamente utilizado, evidenciando os desafios na obtenção de correlações precisas para fenômenos de fadiga em pavimentos asfálticos. Diante disso, esse FLC (10^4) foi utilizado na Equação 14, na determinação do número N pelos modelos de fadiga obtidos para cada mistura asfáltica.

Franco (2007) também desenvolveu modelos para estimar a vida de fadiga de misturas asfálticas, considerando a deformação de tração e o módulo de resiliência como parâmetros principais. Foram propostos modelos distintos para misturas com ligante asfáltico convencional (Equação 16), misturas modificadas com polímero e misturas contendo asfalto borracha, não consideradas nesse estudo. Os ensaios foram conduzidos por meio de testes FTI. No entanto, a calibração em condições de campo não pôde ser realizada, motivo pelo qual foi adotado o fator de correlação 10^4 , conforme sugerido por Pinto (1991).

Priest (2005) desenvolveu dois modelos para avaliar a fadiga de pavimentos asfálticos, diferenciando entre aqueles com camadas delgadas de revestimento (inferiores a 12,7 cm) e aqueles com camadas espessas (entre 18 e 23 cm), conforme descrito nas Equações 17 e 18, respectivamente. A calibração desses modelos foi realizada com dados obtidos em trechos experimentais equipados com sensores de pressão, *strain gages* e dispositivos para monitoramento de temperatura e umidade. A coleta de informações ocorreu ao longo do tempo em oito seções de pavimento no *National Center for Asphalt Technology* (NCAT), abrangendo diferentes configurações estruturais.

A análise do subleito foi realizada por meio da comparação entre a máxima deformação específica vertical de compressão (ϵ_v), atuante no topo do subleito, e os valores admissíveis, considerando um sistema de camadas elásticas. O critério de fadiga para deformações verticais de compressão no subleito seguiu o mesmo modelo adotado para a fadiga de misturas asfálticas, sendo expresso pela Equação 19, conforme o modelo proposto por Dormon e Metcalf (1965).

$$N = 6,069 \times 10^{-10} \times \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{4,762} \quad (19)$$

As deformações verticais recuperáveis de um pavimento representam a resposta das camadas estruturais e do subleito à aplicação de carregamentos. Quando uma carga é aplicada em um ponto da superfície do pavimento, todas as camadas sofrem flexão devido às tensões e deformações geradas, sendo que a magnitude do deslocamento geralmente diminui com a profundidade e com o afastamento do ponto de aplicação da carga. Assim, foi fundamental verificar o deslocamento vertical recuperável máximo da superfície do pavimento, também denominado deflexão, comparando-o com o valor de projeto obtido pela expressão matemática do DNIT-PRO 269 (1994), que é função do número “N”, conforme apresentado na Equação 20.

$$\log D_{adm} = 3,148 - 0,188 \times \log N \quad (20)$$

A Tabela 37 apresenta os resultados da análise mecanicista do pavimento, considerando os diferentes tipos de misturas asfálticas e mantendo fixas as camadas subjacentes, conforme descrito no dimensionamento. Os resultados indicam que todas as misturas atenderam apenas aos critérios do *Asphalt Institute* (1976), Franco (2007) e Priest (2005), demonstrando resistência adequada ao tráfego projetado.

Entretanto, ao analisar os demais métodos, verificou-se que nenhuma das misturas atendeu simultaneamente a todos os modelos considerando as espessuras determinadas no dimensionamento. A mistura 70%RAP (7%BO) foi a única que satisfaz o modelo de fadiga obtido no ensaio FTI com espessura inicial de 5 cm, porém não se adequou a outros critérios, como os propostos pelo FHWA (1976), Pinto e Preussler (1980) e Pinto (1991). Isso sugere a necessidade de avaliar camadas mais espessas para atender a um maior número de modelos, garantindo maior segurança no dimensionamento. Além disso, misturas com menor espessura tendem a estar mais suscetíveis a maiores tensões nas fibras inferiores, o que aumenta o risco de trincamento por fadiga.

Para assegurar um projeto mais adequado e alinhado aos princípios da abordagem mecanicista, foi realizada uma análise inversa para determinar a espessura mínima necessária de cada mistura asfáltica, garantindo sua adequação ao nível de tráfego projetado (6×10^6) nos sete modelos avaliados. A Tabela 38 apresenta os resultados, evidenciando que, após a correção das espessuras da camada de revestimento asfáltico, todas as misturas passaram a

suportar níveis de tráfego superiores ao estabelecido no projeto, mantendo as deformações dentro dos limites admissíveis. Destaca-se que nenhuma das misturas atendeu ao critério do modelo de Pinto (1991), que se mostrou o mais conservador entre os analisados. No entanto, optou-se por adotar espessuras que satisfizessem os demais seis modelos, garantindo maior segurança na definição da espessura do revestimento asfáltico e atingindo um índice de conformidade de 85,71% em relação aos modelos considerados.

A Figura 47 apresenta o pavimento com as novas espessuras das camadas determinadas a partir da análise AEMC. Observa-se que todas as espessuras calculadas superaram a recomendação do método do DNIT (7,5 cm) para um número N de projeto de 6×10^6 , situado no intervalo $5 \times 10^6 < N \leq 10^7$. As misturas asfálticas foram avaliadas em diferentes espessuras, com incrementos de 1 cm. As análises contemplaram as seguintes configurações: mistura 0%RAP(0%BO) (9,4 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 15 cm, 20 cm e 21 cm), mistura 15%RAP(0%BO) (11,3 cm, 18 cm e 19 cm), mistura 56%RAP(3%BO) (5 cm, 6 cm, 8 cm, 12 cm e 13 cm), mistura 63%RAP(5%BO) (5 cm, 7 cm, 8 cm, 10 cm, 11 cm e 12 cm) e mistura 70%RAP(7%BO) (5 cm, 7 cm, 8 cm, 9 cm e 10 cm). As últimas espessuras testadas foram aquelas que atenderam aos seis modelos analisados, com exceção do modelo de Pinto (1991), que se mostrou o mais conservador e não foi satisfeito.

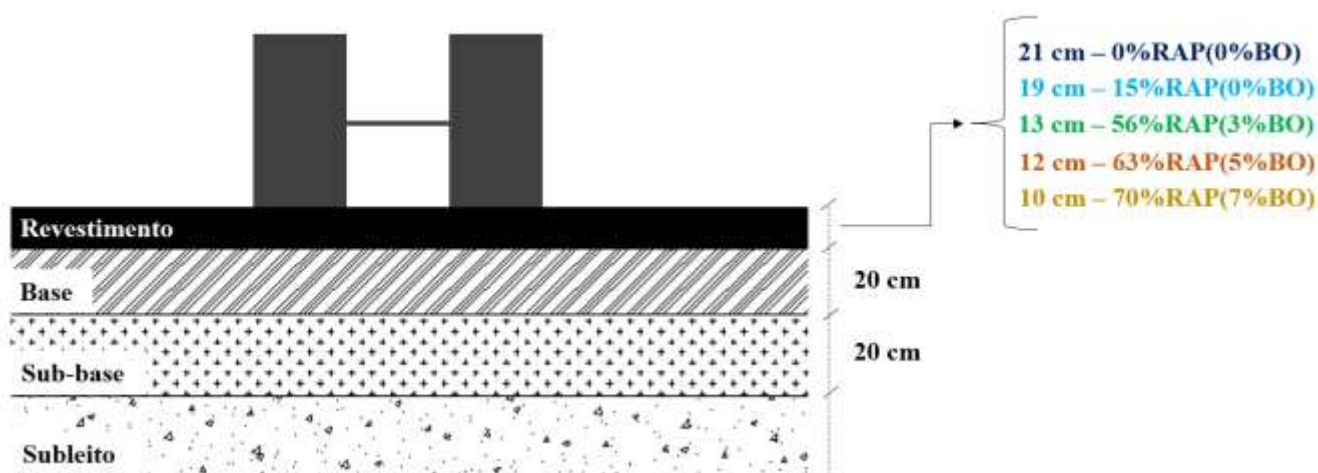


Figura 47 - Novas espessuras das camadas do pavimento após AEMC.

Tabela 37 - Resultado da análise AEMC do pavimento considerando as espessuras obtidas no dimensionamento MeDiNa.

Mistura Asfáltica de Controle - 0%RAP(0%BO) - Espessura de 9.4 cm														
Fadiga da camada de revestimento asfáltico							Deflexão (mm)		Deflexão admissível (mm)	Deslocamento no subleito (m/m)				
Método utilizado	Sob a roda (x = 0,0 cm)			Entre as rodas (x = 16,20 cm)			Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)		Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)	Método Utilizado	Número N calculado	Número N de projeto
	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)								
Asphalt Institute (1976)	1,66E+07			1,39E+07			0,37400901	0,37060476	0,74766589	0,00006529	0,00005848	DNIT-PRO 269 (1994)	5,16E+10	6,00E+06
FWMA (1976)	3,77E+06			3,11E+06										
Pinto e Preussler (1980)	4,26E+06			3,48E+06										
Modelo de Fadiga	9,60E+05	6,00E+06	0,00026900	8,35E+05	6,00E+06	0,00028368								
Pinto (1991)	3,72E+05			3,22E+05										
Franco (2007)	4,94E+08			4,23E+08										
Priest (2005)	1,46E+08			1,24E+08										
Mistura Asfáltica Reciclada - 15%RAP(0%BO) - Espessura de 11.3 cm														
Fadiga da camada de revestimento asfáltico							Deflexão (mm)		Deflexão admissível (mm)	Deslocamento no subleito (m/m)				
Método utilizado	Sob a roda (x = 0,0 cm)			Entre as rodas (x = 16,20 cm)			Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)		Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)	Método Utilizado	Número N calculado	Número N de projeto
	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)								
Asphalt Institute (1976)	4,07E+07			3,82E+07			0,37400901	0,37060476	0,74766589	0,00005366	0,00004850	DNIT-PRO 269 (1994)	5,16E+10	6,00E+06
FWMA (1976)	9,78E+06			9,14E+06										
Pinto e Preussler (1980)	1,16E+07			1,08E+07										
Modelo de Fadiga	8,02E+05	6,00E+06	0,00020526	7,42E+05	6,00E+06	0,00020885								
Pinto (1991)	7,71E+05			7,26E+05										
Franco (2007)	8,76E+08			1,01E+09										
Priest (2005)	2,81E+08			3,14E+08										
Mistura Asfáltica Reciclada - 56%RAP(3%BO) - Espessura de 5.0 cm														
Fadiga da camada de revestimento asfáltico							Deflexão (mm)		Deflexão admissível (mm)	Deslocamento no subleito (m/m)				
Método utilizado	Sob a roda (x = 0,0 cm)			Entre as rodas (x = 16,20 cm)			Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)		Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)	Método Utilizado	Número N calculado	Número N de projeto
	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)								
Asphalt Institute (1976)	2,29E+07	6,00E+06	0,00024395	1,41E+07	6,00E+06	0,00022358	0,42413389	0,43310238	0,74766589	0,00007842	0,00007001	DNIT-PRO 269 (1994)	2,21E+10	6,00E+06

FWMA (1976)	5,31E+06	3,15E+06			
Pinto e Preussler (1980)	6,10E+06	3,53E+06			
Modelo de Fadiga	1,84E+06	1,24E+06			
Pinto (1991)	4,91E+05	3,28E+05			
Franco (2007)	4,16E+08	3,53E+08			
Priest (2005)	1,33E+08	1,06E+08			

Mistura Asfáltica Reciclada - 63%RAP(5%BO) - Espessura de 5.0 cm

Fadiga da camada de revestimento asfáltico							Deflexão (mm)		Deflexão admissível (mm)	Deslocamento no subleito (m/m)				
Método utilizado	Sob a roda (x = 0,0 cm)			Entre as rodas (x = 16,20 cm)			Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)		Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)	Método Utilizado	Número N calculado	Número N de projeto
	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)								
Asphalt Institute (1976)	2,01E+07			1,17E+07			0,42701117	0,43977160	0,74766589	0,00007931	0,00007084	DNIT-PRO 269 (1994)	2,08E+10	6,00E+06
FWMA (1976)	4,61E+06			2,60E+06										
Pinto e Preussler (1980)	5,26E+06			2,88E+06										
Modelo de Fadiga	2,66E+06	6,00E+06	0,00025437	1,69E+06	6,00E+06	0,00029883								
Pinto (1991)	4,40E+05			2,86E+05										
Franco (2007)	4,07E+08			2,57E+08										
Priest (2005)	1,27E+08			7,75E+07										

Mistura Asfáltica Reciclada - 70%RAP(7%BO) - Espessura de 5.0 cm

Fadiga da camada de revestimento asfáltico							Deflexão (mm)		Deflexão admissível (mm)	Deslocamento no subleito (m/m)				
Método utilizado	Sob a roda (x = 0,0 cm)			Entre as rodas (x = 16,20 cm)			Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)		Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)	Método Utilizado	Número N calculado	Número N de projeto
	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)								
Asphalt Institute (1976)	1,75E+07			9,79E+06			0,42962344	0,44663427	0,74766589	0,00008016	0,00007165	DNIT-PRO 269 (1994)	1,96E+10	6,00E+06
FWMA (1976)	3,97E+06			2,14E+06										
Pinto e Preussler (1980)	4,50E+06			2,35E+06										
Modelo de Fadiga	91196989,26	6,00E+06	0,00026525	73716223,76	6,00E+06	0,00031567								
Pinto (1991)	391620,3687			245638,292										
Franco (2007)	396742239,1			241472562,2										
Priest (2005)	121569724,3			71304483,79										

Tabela 38 - Resultados da análise AEMC considerando o nível de tráfego e as novas espessuras das camadas de revestimento asfáltico para cada tipo de mistura.

Mistura Asfáltica de Controle - 0%RAP(0%BO) - Espessura de 21.0 cm														
Fadiga da camada de revestimento asfáltico							Deflexão (mm)		Deflexão admissível (mm)	Deslocamento no subleito (m/m)				
Método utilizado	Sob a roda (x = 0,0 cm)			Entre as rodas (x = 16,20 cm)			Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)		Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)	Método Utilizado	Número N calculado	Número N de projeto
	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)								
Asphalt Institute (1976)	1,82E+08			2,37E+08			0,22516100	0,22926620	0,74766589	0,00003500	0,00002900	DNIT-PRO 269 (1994)	1,79E+12	6,00E+06
FWMA (1976)	4,84E+07			6,42E+07										
Pinto e Preussler (1980)	6,23E+07			8,37E+07										
Modelo de Fadiga	6,26E+06	6,00E+06	0,00013000	7,69E+06	6,00E+06	0,00012000								
Pinto (1991)	2,56E+06			3,16E+06										
Franco (2007)	3,84E+09			4,81E+09										
Priest (2005)	1,44E+10			1,69E+09										
Mistura Asfáltica Reciclada - 15%RAP(0%BO) - Espessura de 19 cm														
Fadiga da camada de revestimento asfáltico							Deflexão (mm)		Deflexão admissível (mm)	Deslocamento no subleito (m/m)				
Método utilizado	Sob a roda (x = 0,0 cm)			Entre as rodas (x = 16,20 cm)			Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)		Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)	Método Utilizado	Número N calculado	Número N de projeto
	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)								
Asphalt Institute (1976)	2,37E+08			2,37E+08			0,22536000	0,22627000	0,74766589	0,00003100	0,00002900	DNIT-PRO 269 (1994)	1,79E+12	6,00E+06
FWMA (1976)	6,42E+07			6,42E+07										
Pinto e Preussler (1980)	8,37E+07			8,37E+07										
Modelo de Fadiga	6,98E+06	6,00E+06	0,00012000	6,98E+06	6,00E+06	0,00012000								
Pinto (1991)	3,16E+06			3,16E+06										
Franco (2007)	4,81E+09			4,81E+09										
Priest (2005)	1,63E+10			1,69E+09										
Mistura Asfáltica Reciclada - 56%RAP(3%BO) - Espessura de 13 cm														
Fadiga da camada de revestimento asfáltico							Deflexão (mm)		Deflexão admissível (mm)	Deslocamento no subleito (m/m)				
Método utilizado	Sob a roda (x = 0,0 cm)			Entre as rodas (x = 16,20 cm)			Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)		Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)	Método Utilizado	Número N calculado	Número N de projeto
	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)								
Asphalt Institute (1976)	1,14E+08	6,00E+06	0,00015000	1,43E+08	6,00E+06	0,00014000	0,27383000	0,26785000	0,74766589	0,00004200	0,00003800	DNIT-PRO 269 (1994)	4,22E+11	6,00E+06

FWMA (1976)	2,93E+07	3,73E+07			
Pinto e Preussler (1980)	3,67E+07	4,74E+07			
Modelo de Fadiga	6,78E+06	8,15E+06			
Pinto (1991)	1,78E+06	2,14E+06			
Franco (2007)	1,64E+09	1,99E+09			
Priest (2005)	5,79E+08	7,14E+08			

Mistura Asfáltica Reciclada - 63%RAP(5%BO) - Espessura de 12 cm

Fadiga da camada de revestimento asfáltico							Deflexão (mm)		Deflexão admissível (mm)	Deslocamento no subleito (m/m)				
Método utilizado	Sob a roda (x = 0,0 cm)			Entre as rodas (x = 16,20 cm)			Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)		Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)	Método Utilizado	Número N calculado	Número N de projeto
	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)								
Asphalt Institute (1976)	7,53E+07			7,53E+07			0,29826000	0,29142000	0,74766589	0,00006031	0,00005419	DNIT-PRO 269 (1994)	2,47E+11	6,00E+06
FWMA (1976)	1,89E+07			1,89E+07										
Pinto e Preussler (1980)	2,31E+07			2,31E+07										
Modelo de Fadiga	8,08E+06	6,00E+06	0,00017000	8,08E+06	6,00E+06	0,00017000								
Pinto (1991)	1,28E+06			1,28E+06										
Franco (2007)	1,26E+09			1,26E+09										
Priest (2005)	4,29E+08			4,29E+08										

Mistura Asfáltica Reciclada - 70%RAP(7%BO) - Espessura de 10 cm

Fadiga da camada de revestimento asfáltico							Deflexão (mm)		Deflexão admissível (mm)	Deslocamento no subleito (m/m)				
Método utilizado	Sob a roda (x = 0,0 cm)			Entre as rodas (x = 16,20 cm)			Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)		Sob a roda (x = 0,0 cm)	Entre as rodas (x = 16,20 cm)	Método Utilizado	Número N calculado	Número N de projeto
	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)	Número N calculado	Número N de projeto	Deslocamento (m/m)								
Asphalt Institute (1976)	3,59E+07			3,27E+07			0,34199178	0,33426889	0,74766589	0,00005768	0,00005194	DNIT-PRO 269 (1994)	9,07E+10	6,00E+06
FWMA (1976)	8,55E+06			7,76E+06										
Pinto e Preussler (1980)	1,01E+07			9,09E+06										
Modelo de Fadiga	1,19E+08	6,00E+06	0,00021326	1,15E+08	6,00E+06	0,00021928								
Pinto (1991)	6,99E+05			6,49E+05										
Franco (2007)	7,35E+08			6,79E+08										
Priest (2005)	2,36E+08			2,17E+08										

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo laboratorial com misturas asfálticas incorporando RAP e óleo de babaçu resultou nas seguintes conclusões:

- As misturas asfálticas recicladas com altos teores de RAP mostraram uma significativa melhora nos valores de resistência à tração indireta (RTI) em comparação à mistura convencional. A adição de óleo de babaçu, especialmente na mistura com 70%RAP(7%BO), reduziu a rigidez e, ao mesmo tempo, aumentou a coesão entre os materiais, promovendo um melhor desempenho mecânico.
- A resistência ao dano por umidade das misturas com 70%RAP(7%BO) e 63%RAP(5%BO) foi elevada, conforme os resultados de RRTI. A adição de óleo de babaçu melhorou a adesão ligante-agregado, proporcionando desempenho igual ou superior ao da mistura convencional, indicando maior durabilidade para pavimentos em áreas de alta umidade.
- O módulo de resiliência (MR) das misturas recicladas foi superior ao da mistura de referência, indicando maior rigidez estrutural. No entanto, o óleo de babaçu controlou essa rigidez, equilibrando resistência e flexibilidade. O aumento do MR está diretamente relacionado ao melhor comportamento das misturas recicladas em pavimentos submetidos a cargas repetitivas.
- As misturas com altos teores de RAP (56%, 63% e 70%) demonstraram maior resistência ao afundamento plástico, enquanto o óleo de babaçu minimizou o endurecimento excessivo, mantendo a flexibilidade.
- O ensaio de resistência à fadiga indicou que as misturas asfálticas recicladas com altos teores de RAP (56%, 63%, e 70%) e o uso de óleo de babaçu como agente rejuvenescedor apresentaram um comportamento superior, sendo classificadas na classe de fadiga 4. A mistura convencional (0%RAP) e com menor teor de RAP (15%) foram classificadas em classes inferiores, revelando uma menor vida útil frente à fadiga. Esses resultados evidenciam o impacto positivo do óleo de babaçu em reduzir a rigidez excessiva do RAP, aumentando a durabilidade das misturas.
- O ensaio de desgaste Cântabro revelou que as misturas asfálticas com 70% e 63% de RAP apresentaram as menores perdas de massa, sugerindo uma maior resistência ao

desgaste por abrasão em comparação com a mistura convencional. Isso reforça que a combinação de altos teores de RAP e óleo de babaçu proporciona maior durabilidade frente ao desgaste superficial, um fator crucial para pavimentos sujeitos a tráfego intenso.

- O dimensionamento mecanicista pelo método MeDiNa indicou que as misturas recicladas com maior teor de RAP e rejuvenescedor permitiram reduzir a espessura do revestimento, devido ao seu melhor desempenho mecânico. A menor espessura (10 cm) foi determinada para a mistura com 70% RAP (7% BO), seguida de 12 cm para 63% RAP (5% BO) e 13 cm para 56% RAP (3% BO), evidenciando sua capacidade de suportar cargas de tráfego com menor espessura de pavimento.
- A análise estatística, utilizando ANOVA e o teste de Tukey, demonstrou que houve diferenças estatisticamente significativas entre as misturas asfálticas recicladas e a mistura convencional quanto aos valores de resistência à fadiga, resistência à tração indireta, e módulo de resiliência. A mistura com 70%RAP(7%BO) se destacou, apresentando melhores resultados mecânicos em comparação com as demais.

Dessa forma, a utilização de misturas asfálticas recicladas com altos teores de RAP e óleo de babaçu pode proporcionar melhor desempenho mecânico e maior durabilidade, tornando-as uma solução promissora para a pavimentação sustentável.

CAPÍTULO 5

5. ANÁLISE ECONÔMICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS COM ÓLEO DE BABAÇU

A pesquisa desenvolveu uma análise econômica por quilômetro de rodovia. Inicialmente, considerou-se a “alternativa zero”, que representa a condição atual com a mistura asfáltica convencional. Os resultados foram comparados a essa referência e, a partir dessa base, avaliaram-se alternativas subsequentes até a identificação da opção economicamente mais viável. A Figura 48 apresenta o fluxo logístico, desde a etapa de produção até a aplicação em campo, das misturas asfálticas avaliadas neste estudo.

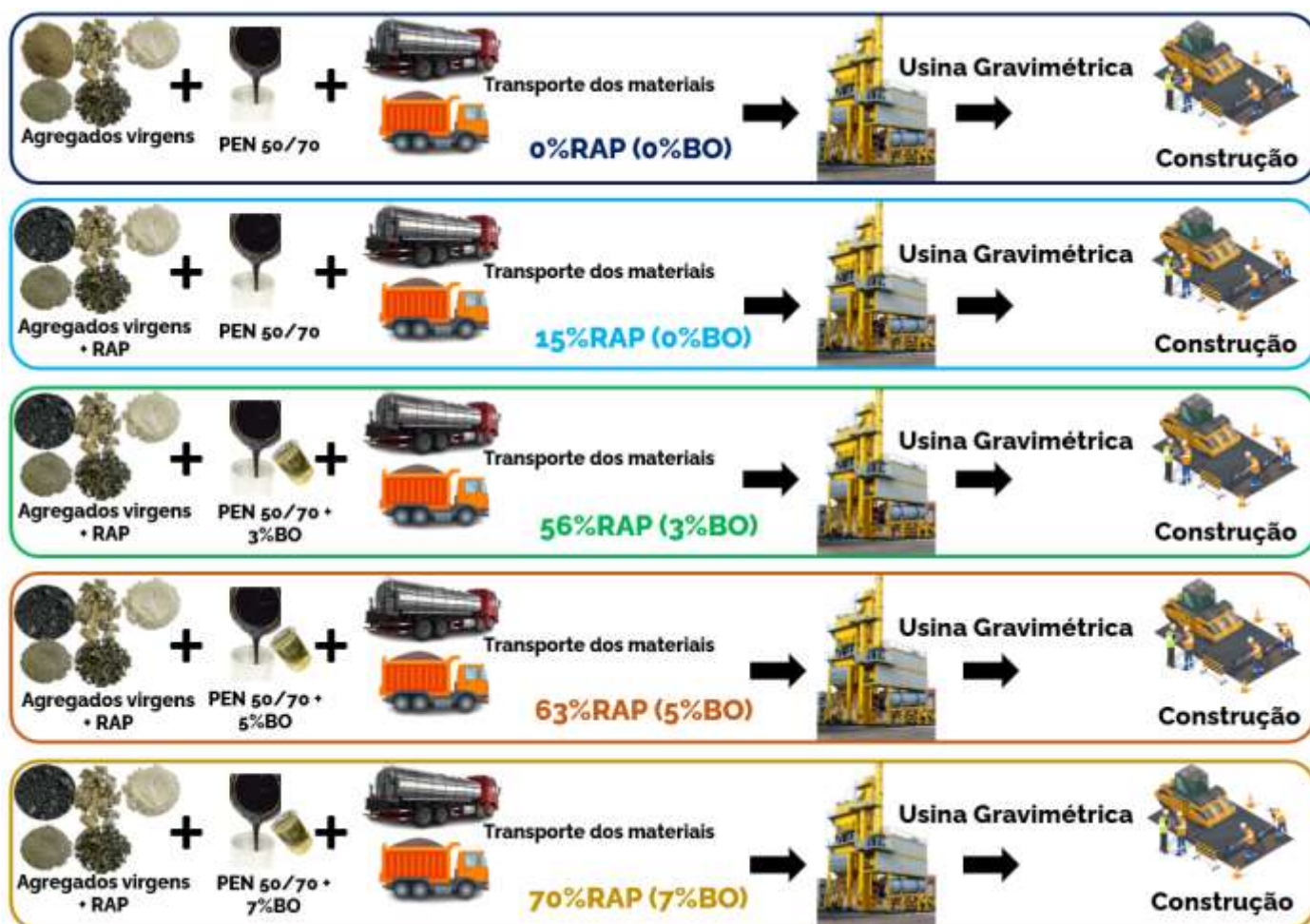


Figura 48 - Logística de produção à construção das misturas asfálticas avaliadas.

5.1. PRESSUPOSTOS

As composições de custos são, comumente, expressas por tonelada de mistura asfáltica produzida, embora tal métrica não reflita com precisão sua aplicação prática em campo. A demanda real por mistura asfáltica está relacionada à extensão da rodovia, o que exige a consideração das espessuras das camadas de revestimento empregadas para cada tipo de mistura. Essa abordagem permite a conversão dos custos para a unidade por quilômetro de rodovia, viabilizando uma análise mais representativa das condições de aplicação.

Misturas com desempenho mecânico inferior tendem a demandar camadas mais espessas, ao passo que aquelas com melhor desempenho estrutural possibilitam reduções na espessura do revestimento. Tal comportamento é respaldado por métodos de dimensionamento mecanicistas, os quais utilizam parâmetros de desempenho como base para o projeto. Dessa forma, a análise de custos torna-se mais objetiva, evidenciando que a alternativa mais econômica é aquela que alia menor custo por tonelada à necessidade de uma espessura reduzida de revestimento.

A estimativa dos custos de produção foi baseada nas composições do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO), utilizando-se a referência “Usinagem de concreto asfáltico – faixa C – areia e brita comerciais” (código 6416078) para a mistura de controle e “Usinagem de concreto asfáltico reciclado em usina com adição de material fresado e brita comercial” (código 6416098) para as misturas recicladas. Ressalta-se que esta última composição é aplicada, em campo, para misturas com cerca de 20% de RAP, percentual atualmente utilizado em rodovias brasileiras na produção de misturas asfálticas recicladas à quente. Tal premissa foi adotada neste estudo devido à ausência de composições de custo específicas para misturas recicladas com elevados teores de RAP. Para a execução do revestimento com a mistura asfáltica de referência, foi utilizada a composição do código 4011463 — Concreto asfáltico – faixa C – areia e brita comerciais. Enquanto para as misturas asfálticas recicladas, adotou-se a composição do código 4011478 — Concreto asfáltico reciclado em usina com adição de asfalto e brita comercial. Inicialmente, os custos foram obtidos por tonelada de mistura e, posteriormente, convertidos para o volume aplicado em campo, considerando-se a largura da pista de rolamento, a espessura da camada e a massa específica máxima medida (Gmm) das respectivas misturas.

A análise foi conduzida com base nos seguintes pressupostos:

- (i) Horizonte de planejamento: 10 anos de vida útil, conforme a estimativa média do DNIT para misturas asfálticas aplicadas na camada de rolamento.
- (ii) 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 uma Taxa Social de Desconto (TSD) de 8,5% ao ano para projetos de infraestrutura avaliados a partir de 2020, conforme apresentado no Guia Geral de Análise Socioeconômica de Custo-Benefício de Projetos de Investimento em Infraestrutura (Ministério da Economia, 2022).
- (iii) Índice de reajuste dos custos de manutenção e conservação: adotou-se o índice de reajustamento de obras rodoviárias acumulado no ano, conforme publicado pelo DNIT no Boletim Administrativo nº 178 (fevereiro de 2025) para conservação rodoviária (5,389%) (DNIT, 2025). Os custos considerados referem-se exclusivamente à recuperação da camada de revestimento asfáltico, uma vez que a reconstrução, envolvendo a remoção da camada existente e a aplicação de uma nova, ocorre apenas ao término da vida útil do pavimento.
- (iv) Impostos e depreciação: não foram considerados, pois o objetivo do estudo é a avaliação econômica do projeto.
- (v) Distância média de transporte dos materiais: 50 km, conforme o Manual de Custos Médios Gerenciais do DNIT (2019), que estabelece essa distância entre o canteiro de obras e os centros fornecedores. Esse valor foi adotado para todos os materiais utilizados, incluindo agregados naturais, ligante asfáltico, RAP e óleo de babaçu.
- (vi) Análise de sensibilidade: a influência da distância de transporte nos custos totais de produção das misturas asfálticas foi avaliada considerando uma distância de 100 km.
- (vii) Unidade funcional: o custo equivalente à produção de misturas asfálticas para 1 km de rodovia foi adotado como referência.
- (viii) Espessuras das camadas de revestimento asfáltico: definidas com base em análises mecanicistas realizadas por meio do software MeDiNa, utilizando-se o método de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) no processo de dimensionamento.
- (ix) Composições unitárias: baseadas no Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) do DNIT, considerando os valores referentes a julho de 2024 (Apêndice A).

5.2. DETERMINAÇÃO DOS INVESTIMENTOS

Na estimativa dos investimentos foram considerados os custos associados à produção das misturas asfálticas em uma usina gravimétrica. A unidade funcional adotada foi o custo equivalente à produção de misturas asfálticas para 1 km de rodovia. Com base nas espessuras das camadas de revestimento determinadas pelo MeDiNa para cada tipo de mistura e considerando uma pista simples com 7 metros de largura, calculou-se o volume necessário de mistura asfáltica para a construção de 1 km de rodovia.

As composições unitárias foram elaboradas conforme o Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) do DNIT, utilizando os valores de julho de 2024. Os custos de transporte foram estimados com base em uma Distância Média de Transporte (DMT) de 50 km, conforme estabelecido pelo DNIT, e foi realizada uma análise de sensibilidade para uma distância de 100 km.

Os custos unitários dos materiais, equipamentos e mão de obra foram obtidos a partir dos relatórios sintéticos de 2024, referentes ao estado da Paraíba, onde foram adquiridos o RAP e os agregados utilizados na pesquisa. Os custos horários dos equipamentos englobam propriedade (depreciação, remuneração de capital, seguros e impostos), manutenção (material rodante, partes de desgaste, reparos) e operação (combustíveis, filtros, mão de obra). Os custos de mão de obra incluem salários, encargos sociais (contribuições previdenciárias), encargos complementares (alimentação, transporte, ferramentas manuais) e adicionais (EPI, exames ocupacionais).

O preço do óleo de babaçu foi obtido por meio de pesquisa em fornecedores ao longo de 2024. O custo do ligante asfáltico PEN 50/70 foi extraído dos relatórios de preços médios ponderados semanais da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) para o mesmo período.

A produção das misturas asfálticas considerou os quantitativos de agregados, ligante asfáltico e óleo de babaçu necessários para a pavimentação de 1 km de rodovia, conforme as espessuras determinadas pelo MeDiNa e apresentadas na subseção 4.3.2 do Capítulo 4. A massa asfáltica por composição foi inicialmente expressa em quilogramas e posteriormente

convertida para toneladas, assegurando compatibilidade com os custos unitários das misturas de controle e recicladas, definidos em toneladas.

Os agregados foram calculados com base nos percentuais da dosagem e convertidos de quilogramas para metros cúbicos, considerando que o custo unitário desse insumo está expresso nessa unidade. O ligante asfáltico e o óleo de babaçu foram quantificados conforme os teores da dosagem e convertidos para toneladas, garantindo compatibilidade com a unidade de custo adotada pelo SICRO/DNIT.

5.3. DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS DE RECUPERAÇÃO/CONSERVAÇÃO

Os custos de recuperação foram calculados considerando um horizonte de 10 anos de vida útil da camada de rolamento, conforme valores obtidos na literatura e nas composições de custos de recuperação disponibilizadas pelo DNIT. O custo médio anual para serviços de conservação de 1 km de rodovia na região Nordeste, referente a outubro de 2024, foi de R\$ 32.127,00 por faixa de pista, conforme os Relatórios do Custo Médio Gerencial (2024). Como a rodovia considerada possui pista simples (duas faixas), o custo total anual de recuperação foi de R\$ 64.254,00 por quilômetro. Ressalta-se que os custos de recuperação e conservação foram considerados equivalentes para todas as misturas asfálticas avaliadas, com base na premissa de que todas apresentaram desempenho mecânico semelhante na maioria dos ensaios realizados, embora as misturas recicladas tenham demonstrado maior vida de fadiga. Entretanto, devido à ausência de análises de desempenho em longo prazo ou de envelhecimento acelerado, essa suposição foi adotada neste estudo como uma simplificação metodológica.

Com base nesse dado, o custo anual de recuperação para cada tipo de mistura foi ajustado utilizando o índice de reajustamento de obras rodoviárias acumulado no ano, conforme divulgado pelo DNIT em fevereiro de 2025 no Boletim Administrativo nº 178, que apresentou um índice de 5,389% (DNIT, 2025).

5.4. MÉTODO DE ANÁLISE ECONÔMICA

O critério adotado para a análise dos custos das diferentes composições foi o Valor Presente Líquido (VPL). Esse método consiste na conversão de todas as variações de caixa esperadas para o instante presente, aplicando-se uma Taxa de Mínima Atratividade (TMA). Em termos práticos, o VPL representa a soma dos fluxos de caixa futuros descontados a uma taxa de juros previamente estabelecida, transportando os desembolsos ao tempo zero do projeto.

A formulação matemática utilizada para o cálculo do VPL está apresentada na Equação 21. Para qualquer alternativa x, o VPL dos fluxos de caixa ao longo de um período de n anos, considerando uma taxa de desconto i, é dado por:

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{F_t}{(1+i)^t} \quad (21)$$

Onde:

- VPL é o valor presente líquido do investimento;
- F_t representa os fluxos de caixa no período t;
- i é a taxa de desconto aplicada;
- t corresponde ao período de análise, variando de 0 a n.

Esse critério possibilita a comparação econômica entre as diferentes composições das misturas asfálticas ao longo do horizonte de análise, considerando os custos de produção e recuperação ao longo do tempo. O VPL foi calculado para todas as alternativas avaliadas: 0% RAP (0% BO), 15% RAP (0% BO), 56% RAP (3% BO), 63% RAP (5% BO) e 70% RAP (7% BO).

Como a abordagem desta pesquisa se restringe à análise de custos, a viabilidade econômica foi determinada com base na alternativa que apresentou o menor valor negativo de VPL, indicando a opção com menor impacto financeiro ao longo do período estudado.

5.5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As composições de custos detalhadas no Apêndice A foram preenchidas para cada tipo de mistura asfáltica. Inicialmente, a análise considerou um transporte com distância de 50 km. Em seguida, essa distância foi ampliada para 100 km, permitindo avaliar a sensibilidade dos custos em relação ao aumento do custo de transporte. A Tabela 39 apresenta os custos unitários por tonelada das misturas, considerando ambas as distâncias de transporte.

A quantificação dos custos de produção das misturas asfálticas demandou a determinação do volume necessário para pavimentar 1 km de rodovia com cada composição. Esse volume foi convertido em volume de asfalto com base na massa específica máxima medida (Gmm) de cada mistura, em conformidade com a unidade funcional adotada (1 km de rodovia). A Tabela 40 apresenta os valores utilizados nas estimativas de custo de produção das misturas. Os dados foram obtidos conforme detalhado no Apêndice A deste trabalho.

Tabela 39 - Custos de produção das misturas asfálticas por tonelada de mistura asfáltica.

Custos unitários das misturas asfálticas por tonelada				
Misturas asfálticas	Custos com equipamentos, mão de obra, materiais e atividades auxiliares (R\$)	Custo com tempo fixo (R\$)	Momento de transporte (50 km) (R\$)	Momento de transporte (100 km) (R\$)
0%RAP (0%BO)	388,66	1,94	73,11	146,22
15%RAP (0%BO)	347,58	2,23	72,53	145,06
56%RAP (3%BO)	237,02	2,63	63,55	127,09
63%RAP (5%BO)	222,69	2,70	62,29	124,58
70%RAP (7%BO)	207,11	2,76	59,78	119,57
Custos totais das misturas asfálticas por tonelada				
Misturas asfálticas	Custo total por tonelada (50 km) (R\$)	Custo total por tonelada (100 km) (R\$)		
0%RAP (0%BO)	463,71	536,82		
15%RAP (0%BO)	422,34	494,87		
56%RAP (3%BO)	303,20	366,74		
63%RAP (5%BO)	287,68	349,97		
70%RAP (7%BO)	269,65	329,44		

Os dados da Tabela 40 indicam que a mistura de controle 0% RAP (0% BO) apresentou o maior custo de produção por tonelada, tanto para o transporte a 50 km quanto a 100 km. A variação da distância não alterou a ordem dos custos unitários, que seguiu a

sequência: 70% RAP (7% BO) < 63% RAP (5% BO) < 56% RAP (3% BO) < 15% RAP (0% BO) < 0% RAP (0% BO). Observou-se, portanto, uma tendência de redução do custo de produção por tonelada à medida que a incorporação de RAP foi ampliada.

Tabela 40 - Quantificações para a determinação dos custos de produção das misturas asfálticas.

Traço das misturas asfálticas					
Constituintes da mistura	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
Brita 19 mm (%)	14,29	14,33	9,65	11,58	12,55
Brita 12,5 mm (%)	25,72	16,24	15,44	11,58	13,51
Areia (%)	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00
Pó de Pedra (%)	48,58	47,75	14,48	9,65	0,00
Cal (%)	1,91	2,87	2,90	2,90	2,90
Ligante Asfáltico Virgem (%)	4,75	4,50	3,40	3,33	3,26
Óleo de Babaçu (%)	0,00	0,00	0,11	0,18	0,25
RAP (%)	0,00	14,33	54,04	60,80	67,55
Total (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Quantitativo das misturas asfálticas em quilograma					
Constituintes da mistura	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
Brita 19 mm (kg)	142,88	143,25	96,50	115,80	125,45
Brita 12,5 mm (kg)	257,18	162,35	154,40	115,80	135,10
Areia (kg)	47,63	0,00	0,00	0,00	0,00
Pó de Pedra (kg)	485,78	477,50	144,75	96,50	0,00
Cal (kg)	19,05	28,65	28,95	28,95	28,95
Ligante Asfáltico Virgem (kg)	47,50	45,00	33,95	33,25	32,55
Óleo de Babaçu (kg)	0,00	0,00	1,05	1,75	2,45
RAP (kg)	0,00	143,25	540,40	607,95	675,50
Total (kg)	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00
Quantitativo das misturas asfálticas em tonelada					
Constituintes da mistura	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
Brita 19 mm (t)	0,1429	0,1433	0,0965	0,1158	0,1255
Brita 12,5 mm (t)	0,2572	0,1624	0,1544	0,1158	0,1351
Areia (kg)	0,0476	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Pó de Pedra (t)	0,4858	0,4775	0,1448	0,0965	0,0000
Cal (t)	0,0191	0,0287	0,0290	0,0290	0,0290
Ligante Asfáltico Virgem (t)	0,0475	0,0450	0,0340	0,0333	0,0326
Óleo de Babaçu (t)	0,0000	0,0000	0,0011	0,0018	0,0025
RAP (t)	0,0000	0,1433	0,5404	0,6080	0,6755
Total (t)	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Quantitativos de asfalto por mistura asfáltica para 1 km de rodovia					
Dados	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
Gmm (kg/m ³)	2.480,0	2.460,0	2.420,0	2.420,0	2.420,0
Espessura (m)	0,21	0,19	0,13	0,12	0,10
Volume (m ³), considerando 7 metros de largura e 1000 metros de extensão	1.470,0	1.330,0	910,0	840,0	700,0
Quantidade em kg de massa asfáltica para 1 km de rodovia	3.645.600,0	3.271.800,0	2.202.200,0	2.032.800,0	1.694.000,0
Quantidade em t de massa asfáltica para 1 km de rodovia	3.645,60	3.271,80	2.202,20	2.032,80	1694,00

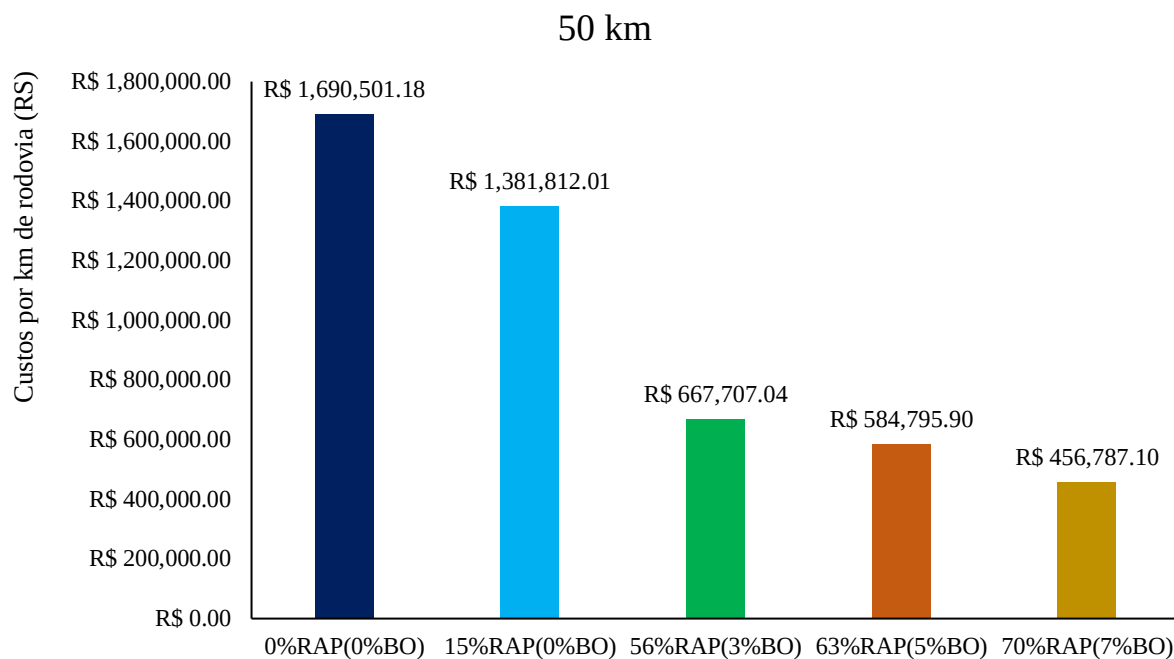
Os custos por quilômetro de rodovia consideraram o volume necessário para pavimentar a camada de revestimento asfáltico, em função da espessura determinada pelo dimensionamento realizado. Para isso, considerou-se as espessuras das camadas de revestimento asfáltico por tipo de mistura asfáltica: 21 cm para a mistura 0%RAP(0%BO), 19 cm para 15%RAP(0%BO), 13 cm para 56%RAP(3%BO), 12 cm para 63%RAP(5%BO) e 10 cm para 70%RAP(7%BO).

Dessa forma, os custos por km de rodovia variam em função da espessura e quantidade de RAP presente na mistura, onde misturas mais delgadas e com maior teor de RAP tendem a apresentar menor custo por km de rodovia. Para avaliar essa influência, os custos por quilômetro foram calculados com base nas quantificações da Tabela 40 e nos custos por tonelada das misturas para ambas as distâncias consideradas, conforme apresentados na Tabela 39. A Figura 49 ilustra os custos por quilômetro de rodovia para as misturas analisadas.

A Figura 49 demonstra um comportamento similar ao observado na Tabela 39, destacando que a mistura 70%RAP(7%BO) se mostrou a mais econômica entre todas as misturas asfálticas analisadas. Como mencionado anteriormente, a mistura 0%RAP(0%BO) exigiu uma maior espessura na camada de revestimento, resultando em um aumento no consumo de material e, conseqüentemente, em um custo de produção superior por quilômetro de rodovia. A economia obtida ao utilizar a mistura com 70% de RAP, em comparação com a mistura de controle, foi de 72,98% e 71,48% para distâncias de transporte de 50 km e 100 km, respectivamente.

As misturas asfálticas recicladas com altos teores de RAP (>50%) apresentaram custos de produção por quilômetro de rodovia semelhantes entre si. As reduções observadas nas misturas com 56% e 63% de RAP, em comparação à mistura de controle, foram de 60,50% e 65,41% para transporte a 50 km, e de 58,73% e 63,65% para transporte a 100 km, respectivamente. Por outro lado, a mistura com 15% de RAP foi a que apresentou a menor redução de custos, com diminuições de 18,26% para 50 km de distância e 17,27% para 100 km.

(a)



(b)

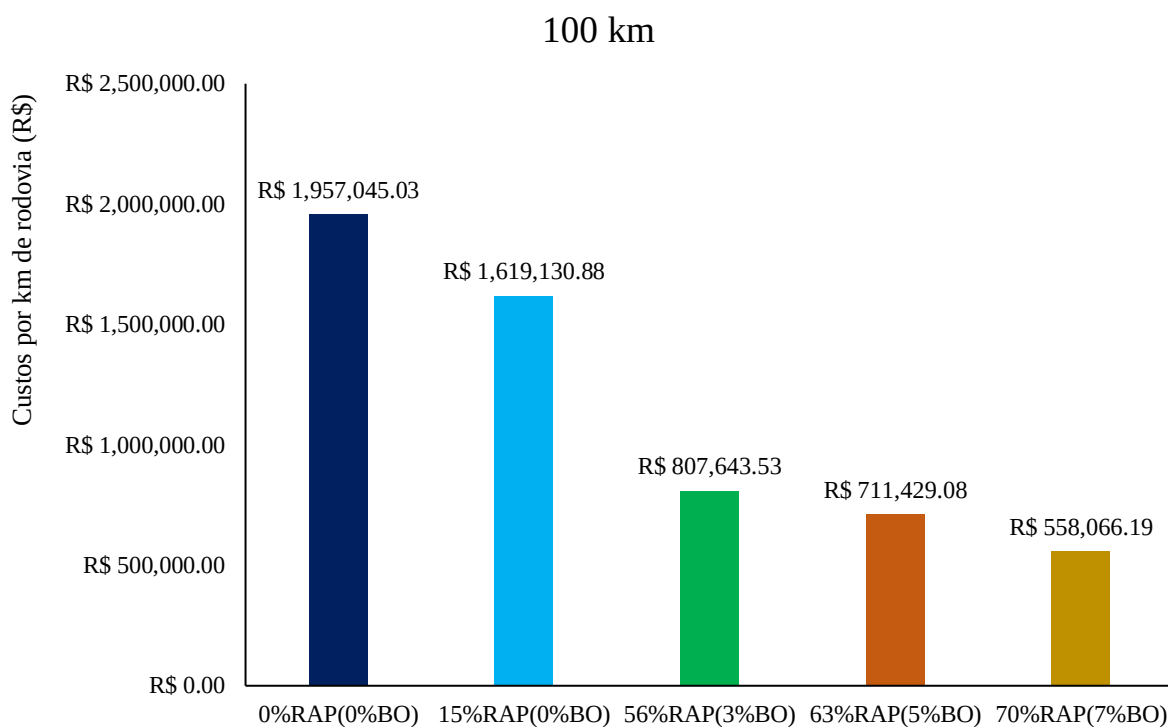


Figura 49 - Custos de produção por km de rodovia para as misturas asfálticas: (a) momento de transporte de 50 km, (b) momento de transporte de 100 km.

Os resultados obtidos estão em consonância com estudos anteriores que investigaram a incorporação de RAP em misturas asfálticas (de Medeiros Melo Neto *et al.*, 2022, 2023b; da Costa *et al.*, 2025). No entanto, é importante destacar que Medeiros Melo Neto *et al.* (2022) avaliaram misturas com 40% de RAP, com e sem a adição de agente rejuvenescedor nos teores de 3% e 5%, utilizando o método empírico de dimensionamento do DNIT. Nesse método, a espessura da camada de revestimento asfáltico depende exclusivamente do nível de tráfego, sendo uniforme para todas as misturas, independentemente de suas composições. Consequentemente, o comportamento dos custos por tonelada prevalece, já que o volume de asfalto demandado permanece constante. As reduções nos custos por quilômetro de rodovia foram de 7,73%, 7,63% e 7,56%, respectivamente, para misturas com 40% de RAP sem rejuvenescedor, com 3% de ácido graxo da borra do óleo de soja, e com 5% desse aditivo.

Medeiros Melo Neto *et al.* (2023) realizaram o mesmo tipo de dimensionamento e observaram reduções nos custos de produção por quilômetro de rodovia ao adicionar 40% de RAP com 6% e 7% de ácido graxo da borra do óleo de soja como agente rejuvenescedor, com reduções de 7,73% e 7,63%, respectivamente. Costa *et al.* (2025) identificaram reduções de 7,43% e 6,57% ao incorporar 33% de RAP com 10% de óleo de algodão e 0,3% de zeólita, respectivamente. É importante ressaltar que os autores também utilizaram o dimensionamento empírico, no qual as espessuras de revestimento foram mantidas constantes para todas as configurações de mistura asfáltica.

Dessa forma, reforça-se a importância de um dimensionamento eficiente que vai além dos métodos empíricos, incorporando a análise mecanicista, que considera o nível de tráfego, o desempenho mecânico das misturas asfálticas e a análise de deformações nas camadas dos pavimentos sob uma abordagem elástica das múltiplas camadas.

Na prática, os custos de pavimentação podem ser elevados devido à maior demanda por mistura asfáltica por quilômetro de rodovia, não se restringindo ao custo por tonelada da mistura. A Tabela 41 apresenta os resultados do fluxo de caixa unitário considerando o quilômetro de rodovia das misturas asfálticas no horizonte de 10 anos de vida útil com taxa de desconto social de 8,5% e índice de reajuste de conservação de 5,389% para uma distância de transporte de 50 km.

Tabela 41 - Fluxo de caixa das misturas asfálticas por km de rodovia.

Mistura asfáltica: 0%RAP(0%BO)											
ITEM	Período (Anos)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Despesas de Capital											
Investimento inicial de construção (R\$)	-2.010.329,66	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	-64.254,00	-64.253,95	-64.253,83	-64.253,72	-64.253,60	-64.253,49	-64.253,37	-64.253,26	-64.253,14	-64.253,03
Fluxo de Caixa (R\$)	-2.010.329,66	-64.254,00	-64.253,95	-64.253,83	-64.253,72	-64.253,60	-64.253,49	-64.253,37	-64.253,26	-64.253,14	-64.253,03
VPL (R\$)	- R\$ 2.431.919,98										
Mistura asfáltica: 15%RAP(0%BO)											
ITEM	Período (Anos)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Despesas de Capital											
Investimento inicial de construção (R\$)	-1.662.794,19	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	-64.254,00	-64.253,95	-64.253,83	-64.253,72	-64.253,60	-64.253,49	-64.253,37	-64.253,26	-64.253,14	-64.253,03
Fluxo de Caixa (R\$)	-1.662.794,19	-64.254,00	-64.253,95	-64.253,83	-64.253,72	-64.253,60	-64.253,49	-64.253,37	-64.253,26	-64.253,14	-64.253,03
VPL (R\$)	- R\$ 2.084.384,50										
Mistura asfáltica: 56%RAP(3%BO)											
ITEM	Período (Anos)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Despesas de Capital											
Investimento inicial de construção (R\$)	-856.831,98	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	-64.254,00	-64.253,95	-64.253,83	-64.253,72	-64.253,60	-64.253,49	-64.253,37	-64.253,26	-64.253,14	-64.253,03
Fluxo de Caixa (R\$)	-856.831,98	-64.254,00	-64.253,95	-64.253,83	-64.253,72	-64.253,60	-64.253,49	-64.253,37	-64.253,26	-64.253,14	-64.253,03
VPL (R\$)	- R\$ 1.278.422,28										
Mistura asfáltica: 63%RAP(5%BO)											
ITEM	Período (Anos)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Despesas de Capital											
Investimento inicial de construção (R\$)	-686.191,97	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	-64.254,00	-64.253,95	-64.253,83	-64.253,72	-64.253,60	-64.253,49	-64.253,37	-64.253,26	-64.253,14	-64.253,03
Fluxo de Caixa (R\$)	-686.191,97	-64.254,00	-64.253,95	-64.253,83	-64.253,72	-64.253,60	-64.253,49	-64.253,37	-64.253,26	-64.253,14	-64.253,03
VPL (R\$)	- R\$ 1.107.782,28										
Mistura asfáltica: 70%RAP(7%BO)											
ITEM	Período (Anos)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Despesas de Capital											
Investimento inicial de construção (R\$)	-602.267,82	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	-64.254,00	-64.253,95	-64.253,83	-64.253,72	-64.253,60	-64.253,49	-64.253,37	-64.253,26	-64.253,14	-64.253,03
Fluxo de Caixa (R\$)	-602.267,82	-64.254,00	-64.253,95	-64.253,83	-64.253,72	-64.253,60	-64.253,49	-64.253,37	-64.253,26	-64.253,14	-64.253,03
VPL (R\$)	- R\$ 1.023.858,13										

O valor presente líquido (VPL) do fluxo de caixa das misturas asfálticas recicladas no período de 10 anos foi inferior ao obtido para a mistura asfáltica de controle. As reduções foram mais consideráveis para as misturas com maiores teores de RAP, com as seguintes reduções: 14,29%, 47,43%, 54,45% e 57,90% para as misturas com 15%, 56%, 63% e 70% de RAP, respectivamente. Verificou-se que as reduções observadas no VPL das misturas recicladas, em comparação à mistura de controle (0% RAP e 0%BO), foram menores do que aquelas calculadas com base apenas nos custos de produção por quilômetro de rodovia. Essa diferença se deve ao fato de que os custos relacionados à construção e à recuperação/conservação da camada de revestimento asfáltico foram equivalentes para todas as misturas. Dessa forma, apenas os custos de produção apresentaram variação, impactando diretamente no custo total de investimento por quilômetro pavimentado.

Melo Neto *et al.* (2022) analisaram o VPL de misturas asfálticas recicladas e verificaram reduções inferiores às observadas neste estudo, com decréscimos de 9,01%, 8,92% e 8,85% para misturas contendo 40% de RAP, 40% de RAP com 3% de ácido graxo da borra do óleo de soja e 40% de RAP com 5% desse aditivo, respectivamente. Esses valores resultam da adoção de uma mesma espessura da camada de revestimento asfáltico, uma vez que o dimensionamento foi realizado pelo método do DNIT, que não incorpora critérios mecanicistas.

De modo semelhante, Costa *et al.* (2025) registraram reduções no VPL ao adicionar 33% de RAP com 10% de óleo de algodão bruto e 33% de RAP com 0,3% de zeólita, obtendo reduções de 7,43% e 6,57% em relação à mistura convencional. Esses autores também empregaram o método do DNIT, mantendo espessuras uniformes para todas as composições avaliadas. Esses resultados reforçam a necessidade de um dimensionamento mais avançado, como o método MeDiNa, que considera parâmetros mecânicos e análises mecanicistas para definir as espessuras das camadas asfálticas.

Qiao *et al.* (2019) constataram que os custos associados à mistura asfáltica à quente com 40% de RAP foram inferiores aos da mistura de controle em todas as configurações estruturais avaliadas (padrão, de resistência média e de resistência profunda), devido à redução no consumo de materiais durante a produção. As economias obtidas variaram entre 0,2% e 18,3%. Embora tenha havido necessidade de intervenções adicionais para controle da fissuração térmica, os custos de manutenção permaneceram inferiores à economia gerada na

fase produtiva. Ressalta-se que, na estrutura padrão, a redução de custos foi mais significativa, atingindo 18,3%, sobretudo pela menor frequência de aplicação de camadas de sobreposição. Assim como em estudos anteriores, a análise foi conduzida adotando-se espessura fixa para todas as misturas.

Contudo, é importante destacar que são necessárias análises dessas misturas asfálticas a longo prazo, como a execução de pistas experimentais, com o objetivo de verificar e comparar a durabilidade dessas misturas em campo em relação à mistura de controle. Ou seja, é essencial avaliar se, de fato, haverá equivalência na durabilidade e na necessidade de manutenção, ou se haverá superioridade ou inferioridade nesses aspectos, pois isso impacta diretamente nos custos de recuperação/conservação do pavimento, incluindo selagem de trincas, operações de tapa-buracos, entre outros.

5.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na análise dos custos de produção das misturas asfálticas recicladas com óleo de babaçu por quilômetro de rodovia, foram obtidas as seguintes conclusões:

- (1) A mistura de controle 0% RAP(0%BO) apresentou o maior custo de produção por tonelada, enquanto a mistura com 70%RAP(7%BO) foi a mais econômica.
- (2) A incorporação de RAP reduziu consideravelmente os custos de produção por quilômetro de rodovia, com reduções de 18,26%, 60,50%, 65,41% e 72,98% para as misturas com 15%, 56%, 63% e 70% RAP, respectivamente, considerando uma distância de transporte de 50 km. Para 100 km, essas reduções foram 17,27%, 58,73%, 63,65% e 71,48%, demonstrando a robustez do efeito da reciclagem.
- (3) Misturas recicladas com altos teores de RAP (>50%) apresentaram custos similares entre si, indicando um ponto de estabilização nos ganhos econômicos a partir desse nível de substituição.
- (4) A distância de transporte influenciou os custos, mas não alterou a hierarquia entre as misturas, mantendo-se a tendência de redução de custos com o aumento do teor de RAP e óleo de babaçu.

- (5) O custo por quilômetro de rodovia evidenciou que avaliações baseadas apenas no custo por tonelada de mistura podem gerar interpretações equivocadas sobre a viabilidade econômica das misturas recicladas, se não forem considerados os efeitos da espessura do revestimento.
- (6) O uso de métodos de dimensionamento mais avançados, como o MeDiNa, permite uma avaliação mais realista do custo-benefício das misturas recicladas, evitando superestimções da economia circular baseadas apenas no custo unitário por tonelada.
- (7) O valor presente líquido (VPL) das misturas asfálticas recicladas ao longo de 10 anos foi inferior ao da mistura controle, com reduções de 14,29%, 47,43%, 54,45% e 57,90% para o uso de 15%, 56%, 63% e 70% de RAP, respectivamente.

CAPÍTULO 6

6. AVALIAÇÃO INTEGRADA DE CIRCULARIDADE E SUSTENTABILIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS COM ÓLEO DE BABAÇU

A economia circular tem desempenhado um papel central na busca por pavimentos asfálticos mais sustentáveis, ao reduzir a extração de matérias-primas e incentivar a reutilização de resíduos na produção de misturas asfálticas (Mantalovas; Di Mino, 2019, 2020). Apesar dos avanços nessa abordagem, ainda não existe um método padronizado para quantificar a circularidade dos materiais reciclados aplicados em pavimentos, o que dificulta a avaliação de seus benefícios ambientais e econômicos.

Nesse contexto, torna-se necessário estabelecer indicadores que permitam mensurar os impactos ambientais da incorporação de materiais reciclados nas misturas asfálticas (da Costa *et al.*, 2024). O Índice de Circularidade do Material (ICM) surge como uma alternativa viável para quantificar o nível de reaproveitamento de insumos, fornecendo uma ferramenta objetiva para a análise da circularidade no setor de pavimentação. Sua aplicação pode auxiliar órgãos reguladores e empresas do setor a adotar estratégias mais eficientes e sustentáveis na gestão de materiais e processos construtivos (de Moraes *et al.*, 2023).

Neste capítulo, a avaliação da circularidade das misturas asfálticas recicladas foi conduzida sob a ótica da economia circular, sendo estruturada em três etapas principais: (i) realização de uma *Scoping Review* sobre a aplicação do conceito de circularidade em misturas asfálticas; (ii) determinação do Índice de Circularidade do Material (ICM), com base nas metodologias propostas por Mantalovas e Di Mino (2020) e Costa *et al.* (2024), incorporando variações metodológicas associadas à redefinição do fator de utilidade; e (iii) desenvolvimento de um índice integrado de circularidade e sustentabilidade voltado à avaliação de misturas asfálticas recicladas. As etapas foram detalhadas em subseções específicas, nas quais se descrevem os procedimentos adotados e os principais resultados obtidos, culminando na formulação do índice integrado. A Figura 50 apresenta o fluxograma representativo das etapas realizadas na análise de circularidade.

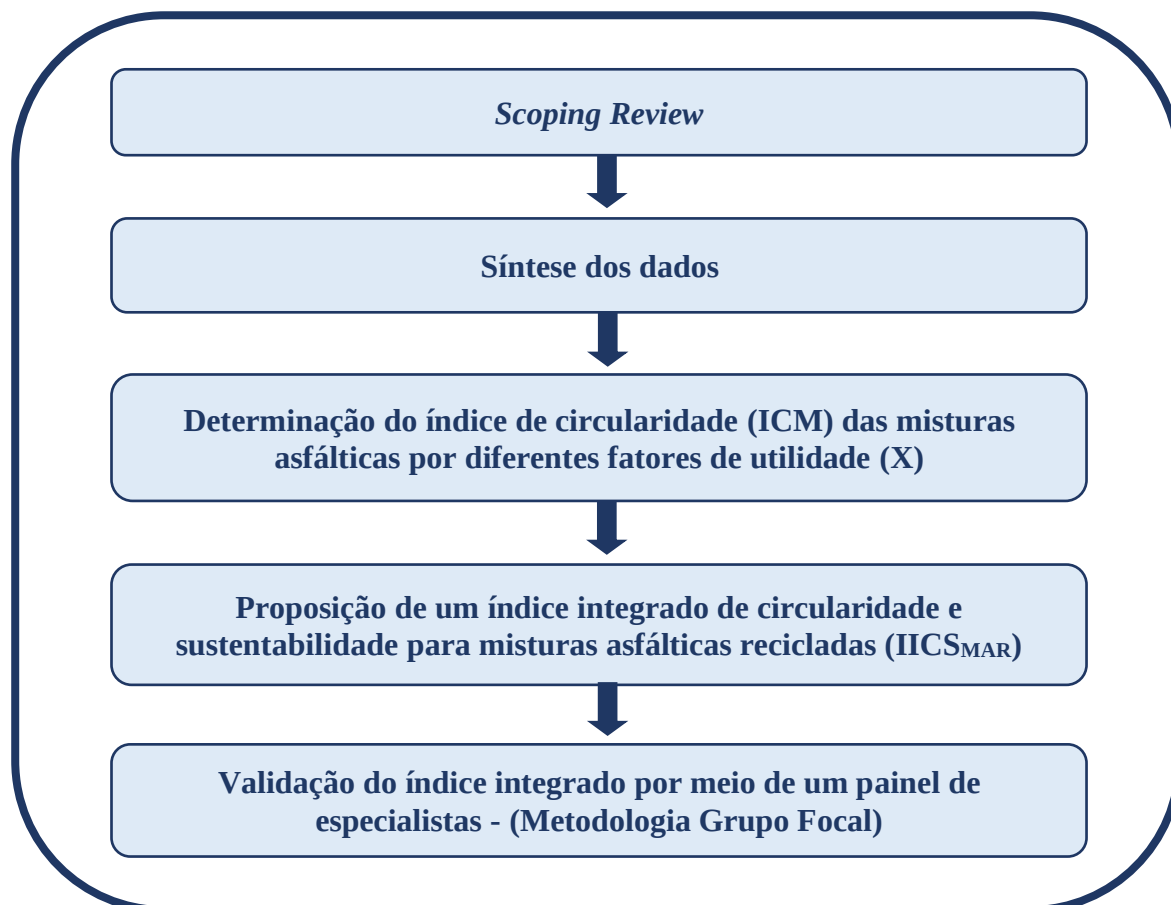


Figura 50 - Fluxograma das etapas para determinação da circularidade das misturas asfálticas.

6.1. SCOPING REVIEW

O método de revisão de escopo (*scoping review*) é uma abordagem amplamente empregada para examinar a literatura relacionada a um tema específico, proporcionando um mapeamento abrangente de estudos para analisar a extensão, o alcance e a natureza da pesquisa. Este método visa resumir e divulgar os dados da pesquisa, ao mesmo tempo que identifica lacunas nas investigações existentes (Arksey; O'Malley, 2005; Peters *et al.*, 2015; Munn *et al.*, 2018). O processo de revisão de escopo adota a transparência e replicabilidade associadas às etapas da revisão sistemática, embora seu propósito primordial não inclua a avaliação da qualidade das evidências produzidas (Armstrong *et al.*, 2011).

Atualmente, existem lacunas na literatura relacionadas à realização de *scoping reviews* sobre a aplicação da economia circular em misturas asfálticas. Uma busca preliminar, realizada na plataforma *Scopus* no início de março de 2025 utilizando o descritor “*scoping*

review”, revelou que, dentre todos os documentos encontrados, apenas 4,91% estavam relacionados à área de engenharia (*engineering*) e 4,13% à ciência ambiental (*environmental science*). Ao refinar a busca com os termos (“*scoping review*” AND “*asphalt mixture*”), obteve-se apenas um documento, um artigo científico publicado em novembro de 2023 na revista *Sustainable Production and Consumption*, intitulado “*Exploring the environmental assessment of circular economy in the construction industry: A scoping review*” (Muñoz; Hosseini; Crawford, 2023). O mesmo resultado foi encontrado ao utilizar os descritores (“*scoping review*” AND “*asphalt mixture*” AND “*circular economy*”).

Portanto, é fundamental realizar um estudo abrangente que explore e mapeie as metodologias empregadas na mensuração da circularidade de misturas asfálticas. Este mapeamento possibilitará uma análise crítica dos métodos mais representativos e aqueles que proporcionam uma avaliação mais precisa da viabilidade da circularidade dessas misturas. Consequentemente, tal estudo facilitará a proposta de um novo índice de circularidade para as misturas asfálticas.

6.1.1. METODOLOGIA DA SCOPING REVIEW

O objetivo da *Scoping Review* foi identificar as metodologias e instrumentos utilizados para mensurar a circularidade das misturas asfálticas. Para isso, foi adotado o PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) como abordagem metodológica, uma vez que este contribui para aprimorar a transparência e a qualidade das revisões, incluindo as de escopo. Trata-se de um guia de redação científica que inclui um *checklist* e um fluxograma, com a finalidade de padronizar as revisões e possibilitar a replicação dos estudos por outros pesquisadores. A extensão do PRISMA para *Scoping Reviews* consiste em uma lista de verificação com 22 itens, que cobre todos os aspectos do manuscrito (Peters *et al.*, 2020). A pesquisa bibliográfica foi conduzida no início de fevereiro de 2025, utilizando bases de dados acadêmicas de reconhecida relevância internacional, tais como *Web of Science (Clarivate)*, *Scopus (Elsevier/ScienceDirect)*, *SciELO* e *Google Scholar*. A Figura 51 ilustra o fluxograma da *Scoping Review* realizada sobre o índice de circularidade em pavimentos.

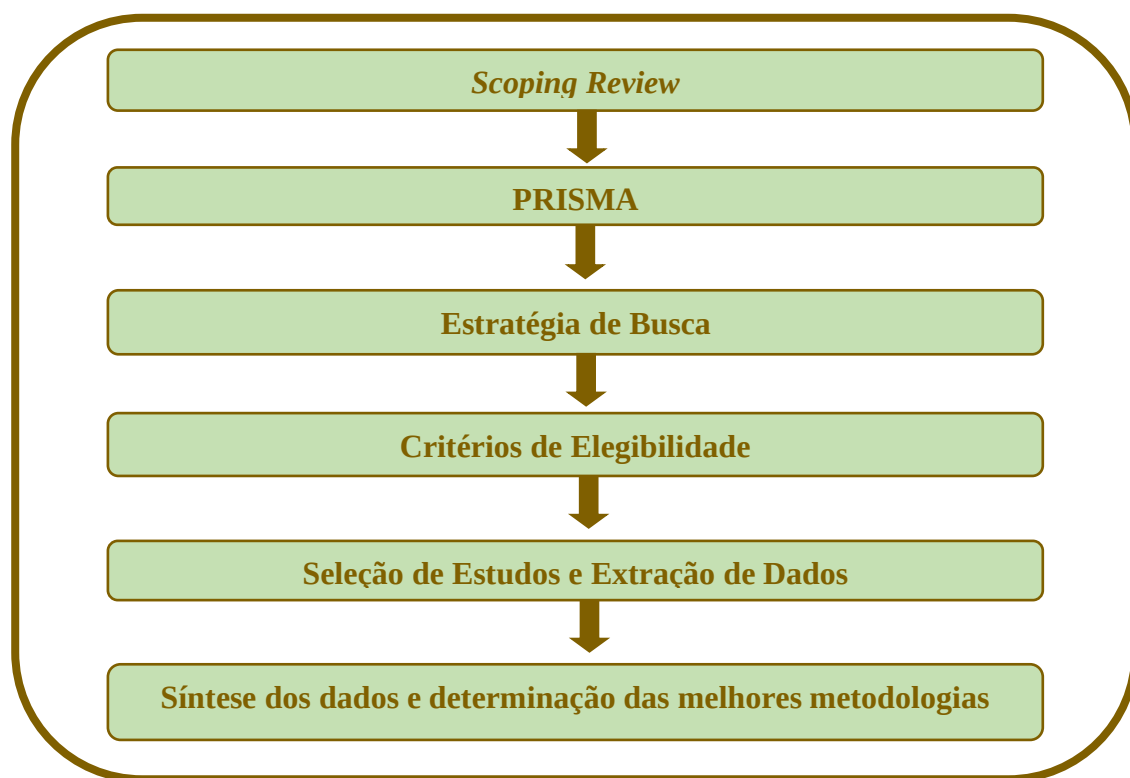


Figura 51 - Fluxograma da *Scoping Review*.

A estratégia de busca empregou termos relacionados à mensuração da circularidade no contexto da pavimentação, considerando sinônimos frequentemente utilizados na área, como (“*asphalt mix*” OR “*asphalt*” OR “*asphalt materials*” OR “*asphalt pavement*” OR “*asphalt binder*” OR “*asphalt concrete*”) AND (“*circularity index*” OR “*material circularity index*”). Quanto aos critérios de elegibilidade, não houve restrição quanto ao ano, idioma ou status de publicação. Foram excluídos artigos duplicados e aqueles que não abordavam misturas asfálticas ou economia circular.

Na seleção dos estudos e extração dos dados, dois revisores treinados realizaram a busca nas bases de dados de forma independente. Os resumos dos artigos foram cuidadosamente avaliados, e aqueles que não atendiam aos critérios de elegibilidade foram excluídos. Nos casos em que as informações fornecidas nos resumos eram insuficientes para uma decisão final, as referências correspondentes foram selecionadas para leitura completa.

Após a triagem inicial e a remoção de textos duplicados, os artigos potenciais foram submetidos a uma leitura detalhada para determinar a amostra final. A coleta de dados foi conduzida de forma cega por dois pesquisadores, e, em caso de divergências, um terceiro

pesquisador foi consultado para alcançar um consenso. A concordância entre os avaliadores foi avaliada utilizando o teste Kappa.

A extração dos dados foi realizada no Microsoft Excel, com a organização das seguintes informações: autor e ano de publicação, país do estudo, objetivo, instrumentos de coleta de dados, principais resultados, características da amostra (tipo de mistura asfáltica e materiais utilizados) e método de análise de circularidade utilizado. Por fim, foi realizada a síntese dos dados e a determinação das metodologias mais eficazes para avaliar a circularidade das misturas asfálticas.

6.1.2. RESULTADOS E DISCUSSÕES DA *SCOPING REVIEW*

Realizou-se uma *scoping review* com o objetivo de mapear os métodos disponíveis na literatura para a quantificação do índice de circularidade no contexto da pavimentação. A busca inicial resultou em 136 artigos, dos quais 6 foram excluídos por duplicidade. Após a análise dos títulos e resumos, 117 estudos foram descartados por não atenderem aos critérios de inclusão. Esses critérios de inclusão consideraram, entre outros aspectos, a natureza do artigo, a disponibilidade do resumo, a relevância para o tema de interesse, a mensuração da circularidade e a avaliação da circularidade de pavimentos.

Em seguida, foram aplicados os critérios de elegibilidade, que envolveram a verificação da disponibilidade do artigo, a análise da amostra (se asfáltica ou de pavimento), a investigação ou mensuração da circularidade e a inclusão ou não de outros materiais. Com base nesses critérios, os artigos foram, então, incluídos ou excluídos da análise.

Entre os 13 artigos selecionados para leitura integral, 2 foram excluídos por abordarem objetivos diferentes e 3 por não se configurarem como artigos científicos. Após a aplicação dos critérios de elegibilidade, 8 estudos foram incluídos na síntese. O processo de seleção dos artigos é ilustrado no diagrama PRISMA, apresentado na Figura 52.

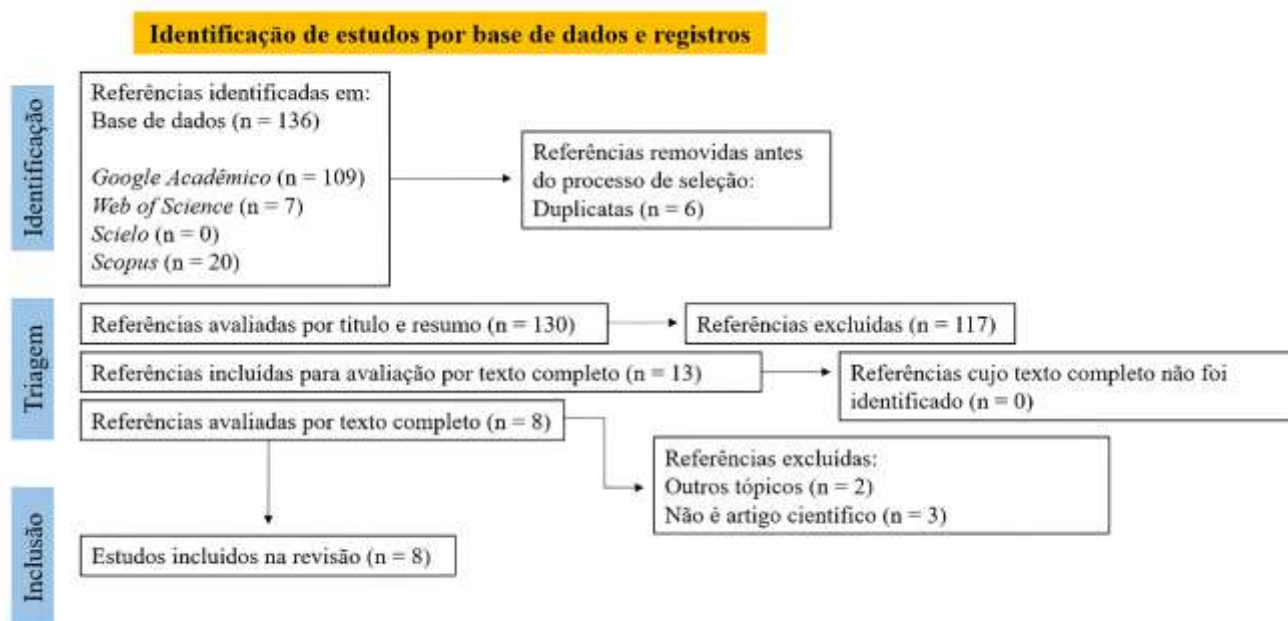


Figura 52 - Fluxograma PRISMA expondo o fluxo de seleção dos estudos para a *Scoping Review*.

As principais características dos estudos analisados estão sintetizadas nas Tabelas 42, 43 e 44. As publicações revisadas abrangem o período de 2019 a 2024, sem limitação temporal definida, e foram predominantemente realizadas na Holanda, Suíça, Brasil, Itália e Irã. Esse padrão revela que os estudos sobre circularidade no contexto da pavimentação asfáltica têm se concentrado nos últimos seis anos. Além disso, observa-se que as pesquisas se concentram, principalmente, no continente europeu, com destaque para a Holanda, Suíça e Itália, seguidas da América do Sul (Brasil) e Ásia (Irã). Esses dados indicam uma mobilização crescente de pesquisadores nessas regiões em busca de soluções para pavimentos mais sustentáveis, especialmente no que diz respeito à integração de materiais residuais dentro da economia circular. A concordância entre os avaliadores quanto à inclusão e exclusão dos artigos no processo de triagem e elegibilidade foi avaliada por meio do coeficiente Kappa (K) (Equação 22), resultando em $K = 0,83$, o que indica um alto grau de concordância entre os avaliadores.

$$K = \frac{\text{Probabilidade}_{\text{observada}} - \text{Probabilidade}_{\text{acaso}}}{1 - \text{Probabilidade}_{\text{acaso}}} \quad (22)$$

Tabela 42 - Características dos artigos 1 a 3 incluídos na *scoping review*.

CRITÉRIOS DE ANÁLISE	ARTIGOS AVALIADOS		
	ARTIGO 1	ARTIGO 2	ARTIGO 3
Título do artigo	<i>Metrics for minimising environmental impacts while maximising circularity in biobased products: The case of lignin-based asphalt</i>	<i>Viability of recycled asphalt mixtures with soybean oil sludge fatty acid</i>	<i>Optimizing recycled asphalt mixtures with zeolite, cottonseed oil, and varied RAP content for enhanced performance and circular economy impact</i>
Autores/Ano	Corona <i>et al.</i> (2022)	Melo Neto <i>et al.</i> (2022)	Costa <i>et al.</i> (2024)
Periódico	<i>Journal of Cleaner Production</i>	<i>Construction and Building Materials</i>	<i>Case Studies in Construction Materials</i>
Nome e conceito do índice de circularidade	Índice de Circularidade do Material (ICM) e novos indicadores de armazenamento de carbono biogênico (BCS100 e c-BCS)	Índice de Circularidade do Material (ICM) aplicado a misturas asfálticas recicladas com ácidos graxos da borra de óleo de soja	Índice de Circularidade para Misturas Asfálticas Recicladas (ICM _{MAR}), incluindo adaptações metodológicas
Objetivo principal	Avaliar a circularidade e sustentabilidade do asfalto à base de lignina em comparação ao asfalto convencional à base de betume	Avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental de misturas asfálticas recicladas contendo 40% de RAP e ácido graxo da borra de óleo de soja como agente rejuvenescedor	Avaliar a otimização de misturas asfálticas recicladas com zeólita, óleo de algodão e diferentes teores de RAP para desempenho mecânico e impacto na economia circular
Base teórica	Baseado nos princípios da economia circular e na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	Baseado na economia circular, utilizando o índice ICM	Fundamentado nos princípios da economia circular, utilizando ICM _{MAR}
Setor de aplicação	Desenvolvido para aplicação em materiais asfálticos, especialmente asfaltos biobaseados.	Engenharia de pavimentação, especialmente para misturas asfálticas recicladas com agentes rejuvenescedores sustentáveis	Engenharia de pavimentação, especialmente para misturas asfálticas recicladas com aditivos sustentáveis
Indicadores considerados	Índice de Circularidade do Material (ICM), BCS100 e c-BCS, além de impactos ambientais (GWP, depleção de recursos)	Índice de Circularidade do Material (ICM), resistência mecânica, desempenho à fadiga e deformação permanente	ICM _{MAR} , resistência mecânica (resistência à tração indireta, fadiga por tração indireta, deformação permanente, abrasão Cântabro, dano por umidade induzida)
Método de cálculo	Uso do ICM para medir a circularidade dos materiais e dois novos indicadores para medir o armazenamento de carbono biogênico	Utilização do ICM conforme metodologia da <i>Ellen MacArthur Foundation</i> , adaptado por Mantalovas e Di Mino (2019) para misturas asfálticas	Aprimoramento do ICM _{MAR} com um fator de utilidade estendido, incluindo parâmetros adicionais como resistência à umidade e abrasão
CrITÉrios de ponderação	Os indicadores consideram a recirculação de materiais, uso de matéria-prima renovável e armazenamento de carbono biogênico	Fatores como fração de material reciclado, eficiência do processo de reciclagem, resistência à fadiga e deformação permanente	Baseado em variáveis mecânicas e ambientais, considerando o desempenho estrutural e a eficiência na reciclagem dos materiais
Unidades de medida	Valores expressos em kg C/m ² , kg CO ₂ /m ² /ano e unidades adimensionais para ICM	Valores expressos em ciclos de carga (fadiga e deformação permanente) e unidades adimensionais para ICM	Valores expressos em ciclos de carga, resistência em MPa e índices adimensionais para ICM _{MAR}
Fontes de dados	Dados experimentais coletados de refinarias de lignina e produtores de asfalto	Ensaio laboratoriais realizados com misturas contendo 40% de RAP e agente rejuvenescedor	Ensaio laboratoriais com misturas contendo diferentes teores de RAP, óleo de algodão e zeólita
Escopo dos dados	Abrange o ciclo de vida completo, desde a produção de matérias-primas até a disposição final do asfalto	Análises laboratoriais de misturas asfálticas recicladas em diferentes composições, considerando resistência mecânica e impacto ambiental	Análises experimentais de misturas recicladas em laboratório, avaliando resistência, durabilidade e circularidade
Limitações de dados	Desafios na modelagem do armazenamento de carbono biogênico e na contabilização da reciclagem do material	Necessidade de validação em condições reais de aplicação e análise do impacto a longo prazo	Necessidade de validação em escala real e avaliação dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida
Materiais ou tecnologias avaliadas	Comparação entre misturas asfálticas convencionais e misturas contendo lignina como substituto parcial do betume	Misturas asfálticas recicladas com RAP (40%) e ácidos graxos de borra de óleo de soja como rejuvenescedor (3% e 5%)	Misturas asfálticas recicladas com diferentes teores de RAP (15%, 25%, 33%) e incorporação de óleo de algodão (4%, 6%, 10%) ou zeólita (0,3%)
Escala de aplicação	Testado em simulações e estudos experimentais de laboratório, com perspectivas para aplicação em escala industrial	Aplicação em ensaios laboratoriais, com potencial de ampliação para estudos em campo	Testes laboratoriais, com potencial para aplicação em projetos de pavimentação sustentável em grande escala

Resultados obtidos	O asfalto à base de lignina apresentou maior circularidade e melhor armazenamento de carbono biogênico, mas com algumas limitações técnicas	As misturas recicladas apresentaram maior circularidade e melhor desempenho em fadiga e deformação permanente em comparação com a mistura convencional	As misturas contendo 0,3% de zeólita e 25% RAP apresentaram melhor desempenho mecânico e ambiental
Impactos ambientais	Avaliação de emissões de carbono, consumo de energia e impactos na mudança climática (GWP)	Redução do consumo de materiais virgens, menor descarte de resíduos asfálticos e potencial redução da pegada de carbono	Redução do consumo de agregados virgens, menor descarte de resíduos asfálticos e potencial de redução da pegada de carbono
Aspectos sociais e econômicos	O artigo menciona custos de ciclo de vida e impactos ambientais, mas não aborda benefícios sociais diretamente	Análise econômica mostrou viabilidade do uso do agente rejuvenescedor sem aumento de custo	O estudo discute viabilidade econômica, destacando a possibilidade de redução de custos sem comprometer o desempenho mecânico
Limitações da sustentabilidade	Não considera impactos sociais e econômicos em profundidade, focando mais nos aspectos ambientais	Ainda há necessidade de estudos adicionais sobre a durabilidade a longo prazo e impactos ambientais indiretos	O estudo não aborda detalhadamente impactos sociais, focando-se mais nos aspectos ambientais e econômicos
Validação experimental	Resultados validados com dados experimentais e simulações baseadas em estudos prévios	Resultados validados por meio de testes mecânicos laboratoriais e modelagem baseada em metodologias estabelecidas	Testes laboratoriais com análise estatística, incluindo comparação entre diferentes composições de misturas recicladas
Reprodutibilidade	A metodologia pode ser replicada para diferentes tipos de misturas asfálticas biobaseadas	Metodologia pode ser replicada para diferentes misturas asfálticas e teores de rejuvenescedor	Metodologia passível de replicação para outras misturas asfálticas recicladas com variações de aditivos
Estudos comparativos	Comparação com asfaltos convencionais e outros estudos de economia circular	Comparação entre misturas asfálticas convencionais e recicladas, destacando benefícios da incorporação de RAP e ácidos graxos de borra de óleo de soja	Comparação entre misturas recicladas e convencionais, com diferentes composições e teores de aditivos
Gaps mencionados	Necessidade de maior validação em condições reais e aprimoramento dos métodos de reciclagem	Necessidade de estudos adicionais sobre efeitos a longo prazo do rejuvenescedor e validação em escala real	Necessidade de estudos adicionais em escala real para avaliação da durabilidade e desempenho a longo prazo
Recomendações futuras	Sugestões para otimizar a circularidade e reduzir custos por meio de novos processos produtivos	Explorar a aplicação em escala real e avaliar impactos ambientais em condições de tráfego real	Explorar aplicações industriais e validar a eficácia da abordagem em diferentes contextos geográficos e ambientais
Especificidade para asfaltos	Os índices abordam características específicas como durabilidade, adesão e estabilidade volumétrica	Abordagem direcionada para misturas asfálticas recicladas e análise da circularidade dos materiais	Índice de circularidade adaptado especificamente para misturas asfálticas recicladas
Potencial de adaptação	Pode ser adaptado para diferentes misturas asfálticas recicladas, com ajustes metodológicos	Possível adaptação para diferentes misturas asfálticas e outros tipos de rejuvenescedores sustentáveis	Pode ser adaptado para diferentes formulações de misturas recicladas, dependendo das condições locais
Requisitos normativos	O índice atende parcialmente a normas técnicas, mas requer ajustes para se tornar mais aplicável na indústria	Ainda não há padronização normativa específica para este tipo de rejuvenescedor	A metodologia ainda não está totalmente alinhada a normas vigentes, mas apresenta potencial para futura padronização
Complexidade de aplicação	O método apresenta desafios práticos devido à necessidade de coleta de dados específicos e cálculos detalhados	Processo relativamente simples em laboratório, mas requer ajustes para implementação em larga escala	O método requer cálculos detalhados e vários ensaios laboratoriais específicos, mas viável para aplicações práticas
Custos associados	A implementação exige investimentos em testes laboratoriais e análises de ciclo de vida	Custos de produção similares aos das misturas convencionais, sem impacto econômico	Custo relativamente baixo de implementação, especialmente em comparação a misturas convencionais
Resultados interpretáveis	Os resultados são úteis para tomada de decisão, mas podem ser complexos para profissionais sem experiência na área	Os resultados fornecem informações nítidas sobre a viabilidade do uso do rejuvenescedor e seus impactos na circularidade das misturas asfálticas	Os resultados permitem uma avaliação clara da viabilidade técnica e ambiental das misturas estudadas

Tabela 43 - Características dos artigos 4 a 6 incluídos na *scoping review*.

Critérios de análise	Artigos Avaliados		
	Artigo 4	Artigo 5	Artigo 6
Título do artigo	<i>The Sustainability of Reclaimed Asphalt as a Resource for Road Pavement Management through a Circular Economic Model</i>	<i>Integrating Circularity in the Sustainability Assessment of Asphalt Mixtures</i>	Economia circular como mecanismo de gestão ambiental: utilização de RAP em camadas de revestimento asfáltico
Autores/Ano	Mantalovas e Di Mino (2019)	Mantalovas e Di Mino (2020)	Mendes <i>et al.</i> (2023)
Periódico	<i>Sustainability</i>	<i>Sustainability</i>	Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade
Nome e conceito do índice de circularidade	Índice de Circularidade do Material (ICM) aplicado ao <i>Reclaimed Asphalt</i> (RA) em um modelo econômico circular	<i>Environmental Sustainability and Circularity Indicator</i> (ESCi), desenvolvido para avaliar a circularidade e sustentabilidade ambiental de misturas asfálticas	Índice de Circularidade do Material (ICM) aplicado ao <i>Reclaimed Asphalt Pavement</i> (RAP) como indicador da economia circular na pavimentação
Objetivo principal	Avaliar a sustentabilidade do asfalto reciclado como um recurso para a gestão de pavimentos rodoviários dentro de um modelo econômico circular	Desenvolver e aplicar um indicador composto (ESCi) que avalia simultaneamente a circularidade e os impactos ambientais de misturas asfálticas recicladas com diferentes teores de RAP	Analisar o potencial da economia circular como ferramenta de gestão ambiental na pavimentação, com foco na reutilização de RAP em camadas de revestimento asfáltico
Base teórica	Baseado nos princípios da economia circular e na metodologia da <i>Ellen MacArthur Foundation</i> para quantificação do ICM	Baseado nos princípios da economia circular e da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), utilizando o Índice de Circularidade do Material (ICM) ajustado para misturas asfálticas	Baseado nos conceitos da economia circular e na metodologia do Índice de Circularidade do Material (ICM), adaptado para misturas asfálticas
Setor de aplicação	Engenharia de pavimentação, com foco na reutilização de asfalto fresado em misturas asfálticas recicladas	Engenharia de pavimentação, com foco na sustentabilidade e reutilização de materiais em misturas asfálticas recicladas	Engenharia de pavimentação, com foco na gestão ambiental e otimização da reutilização de materiais reciclados
Indicadores considerados	Índice de Circularidade do Material (ICM), taxas de reciclagem do asfalto fresado, eficiência dos processos de reutilização e impactos ambientais	ESCi, Índice de Circularidade do Material (ICM), impacto ambiental pela ACV e resistência mecânica das misturas (fadiga e deformação permanente)	Índice de Circularidade do Material (ICM), desempenho mecânico (fadiga e deformação permanente) e impacto ambiental da reciclagem de pavimentos
Método de cálculo	Aplicação do <i>framework</i> do ICM considerando eficiência de reciclagem, demanda por materiais virgens e produção de resíduos	ESCi é calculado como a ponderação dos impactos ambientais da mistura pela sua circularidade, usando ACV e ICM combinados	ICM é determinado com base na metodologia da <i>Ellen MacArthur Foundation</i> , adaptada por Mantalovas e Di Mino (2019) para misturas asfálticas
Critérios de ponderação	Uso de variáveis como taxas de reciclagem, aproveitamento do material reciclado e minimização do desperdício no ciclo de vida	Consideração da sustentabilidade ambiental e circularidade, integrando desempenho mecânico das misturas para quantificação final	Uso de variáveis como fração de matéria-prima reciclada, eficiência da reciclagem e desempenho mecânico das misturas asfálticas
Unidades de medida	ICM expresso em valores adimensionais, além de toneladas para quantificação de RA disponível e utilizado	Valores expressos em ESCi (índice adimensional), ICM, ciclos de carga (fadiga e deformação permanente) e impactos ambientais normalizados	Valores expressos em toneladas de material reciclado e índices adimensionais para quantificação da circularidade
Fontes de dados	Dados extraídos da <i>European Asphalt Pavement Association</i> (EAPA) e estudos de caso aplicados à rede rodoviária italiana	Estudos de caso com misturas asfálticas contendo 0%, 30%, 60% e 90% de RAP, avaliadas por ACV e testes laboratoriais	Revisão sistemática da literatura, baseada em estudos publicados entre 2018 e 2022 sobre RAP e economia circular na pavimentação
Escopo dos dados	Análise em nível europeu, considerando taxas de reciclagem e reutilização de asfalto fresado em diferentes regiões	Análise de laboratório de misturas recicladas, com avaliação de desempenho mecânico e impactos ambientais associados	Análise de estudos de caso sobre misturas asfálticas contendo diferentes teores de RAP e sua relação com a circularidade e desempenho mecânico
Limitações de dados	Necessidade de aprimorar dados regionais sobre a eficiência dos processos de reciclagem e impactos ambientais associados	Necessidade de validação em escala real para avaliar impactos de longo prazo e desempenho estrutural em diferentes contextos climáticos	Falta de padronização metodológica entre os estudos revisados, dificultando comparações diretas entre diferentes abordagens
Materiais ou tecnologias avaliadas	Misturas asfálticas recicladas contendo diferentes teores de RAP e análise de sua circularidade dentro de um modelo econômico sustentável	Misturas asfálticas recicladas com diferentes teores de RAP e análise da viabilidade da economia circular no setor rodoviário	Misturas asfálticas com diferentes teores de RAP, sem a utilização de agentes rejuvenescedores
Escala de aplicação	Estudo de caso aplicado à rede de rodovias da Itália, mas	Estudo de caso na Itália, com potencial para replicação em	Aplicação teórica baseada em estudos de caso, com potencial

	com potencial de replicação para outras regiões da Europa	diferentes regiões e redes rodoviárias	para implementação em projetos reais de infraestrutura rodoviária
Resultados obtidos	As camadas de base apresentaram os maiores índices de circularidade, indicando maior viabilidade para reutilização do RAP	ESCI demonstrou que misturas com 60% e 90% de RAP têm maior circularidade e menor impacto ambiental que as convencionais	Misturas com até 60% de RAP apresentaram melhor desempenho mecânico e circularidade, enquanto misturas com 90% mostraram menor resistência à fadiga
Impactos ambientais	Redução da necessidade de materiais virgens, menor geração de resíduos e potencial de redução da pegada de carbono do setor de pavimentação	Redução da necessidade de agregados virgens, menor pegada de carbono e otimização do uso de recursos	Redução da necessidade de agregados virgens, menor descarte de resíduos asfálticos e diminuição da pegada de carbono do setor rodoviário
Aspectos sociais e econômicos	A análise sugere economia no uso de materiais e viabilidade financeira da reutilização do asfalto fresado	Análise sugere viabilidade econômica na incorporação de RAP sem comprometer a qualidade estrutural das misturas	O estudo sugere que a adoção de RAP pode reduzir custos operacionais e promover maior sustentabilidade no setor de pavimentação
Limitações da sustentabilidade	Desafios relacionados à qualidade dos materiais reciclados e adaptação das normativas para permitir maior incorporação de RAP	Questões relacionadas à resistência mecânica das misturas com altas taxas de RAP ainda precisam ser melhor investigadas	O desempenho mecânico das misturas com altas taxas de RAP pode ser comprometido, exigindo ajustes nas formulações
Validação experimental	Modelagem baseada em dados de mercado e estudos de caso, sem experimentação laboratorial direta	Testes laboratoriais com fadiga e deformação permanente, validados por normas ISO e metodologias estabelecidas	Estudos revisados apresentaram validação laboratorial por meio de ensaios de fadiga e deformação permanente
Reprodutibilidade	Metodologia pode ser replicada para diferentes redes rodoviárias, ajustando-se parâmetros regionais de produção e reciclagem	Metodologia pode ser replicada para diferentes regiões e contextos, ajustando os parâmetros conforme necessidade	Metodologia pode ser replicada em diferentes contextos de pavimentação, dependendo das normativas locais
Estudos comparativos	Comparação entre práticas atuais de reciclagem e cenários de otimização da circularidade do asfalto fresado	Comparação entre misturas convencionais e recicladas, demonstrando ganhos ambientais e econômicos	Comparação entre misturas convencionais e recicladas, destacando vantagens e desafios da incorporação de RAP
Gaps mencionados	Falta de padronização para quantificação da circularidade em misturas asfálticas e necessidade de validação em escala real	Necessidade de diretrizes normativas específicas para promover a utilização de misturas asfálticas recicladas em larga escala	Necessidade de estudos de campo para validação em larga escala e maior padronização na metodologia de avaliação da circularidade
Recomendações futuras	Desenvolvimento de diretrizes normativas para aumentar a taxa de reutilização de RAP e otimizar processos de reciclagem	Expansão da pesquisa para avaliações em campo e revisão de normas para permitir maior incorporação de RAP	Desenvolvimento de normativas específicas para incorporação de RAP e aprimoramento das metodologias de quantificação da circularidade
Especificidade para asfaltos	Metodologia desenvolvida especificamente para misturas asfálticas, com foco na economia circular	Metodologia desenvolvida especificamente para misturas asfálticas, considerando impactos ambientais e mecânicos	Metodologia aplicada exclusivamente para misturas asfálticas recicladas, considerando impactos ambientais e mecânicos
Potencial de adaptação	Possível adaptação para diferentes tipos de misturas recicladas e contextos regionais distintos	Possível adaptação para diferentes formulações e ajustes conforme disponibilidade regional de materiais recicláveis	Pode ser adaptado para diferentes regiões e condições climáticas, dependendo da disponibilidade de RAP e diretrizes normativas locais
Requisitos normativos	Atualmente não há diretrizes padronizadas para a incorporação de altas taxas de RAP em misturas asfálticas	Ausência de normativas padronizadas para altas taxas de RAP, mas estudo sugere direções para regulamentação	Ausência de normativas padronizadas para quantificação da circularidade de misturas asfálticas contendo RAP
Complexidade de aplicação	Método exige modelagem detalhada e coleta de dados específicos, mas apresenta potencial para implementação prática	Método exige cálculos detalhados, mas pode ser integrado a processos de avaliação de sustentabilidade existentes	Método exige cálculos detalhados e dados de desempenho mecânico, mas pode ser aplicado com adaptações específicas
Custos associados	Custos de adaptação dos processos produtivos podem ser compensados pela economia de materiais virgens	Otimização do uso de materiais pode reduzir custos sem comprometer a qualidade e durabilidade das misturas	A utilização de RAP pode reduzir custos de produção, mas requer investimentos em tecnologia para otimização da reciclagem
Resultados interpretáveis	Os resultados fornecem uma visão clara da viabilidade do uso de RA dentro de um modelo econômico circular	Os resultados permitem uma avaliação clara e quantitativa da viabilidade técnica e ambiental das misturas estudadas	Os resultados permitem uma avaliação clara da viabilidade técnica e ambiental da incorporação de RAP em misturas asfálticas

Tabela 44 - Características dos artigos 7 e 8 incluídos na scoping review.

Critérios de análise	Artigos Avaliados	
	Artigo 7	Artigo 8
Título do artigo	<i>Viability of Asphalt Mixtures with Iron Ore Tailings as a Partial Substitute for Fine Aggregate</i>	<i>Development of a Circular Economy Index for a Pavement Management System</i>
Autores/Ano	Moraes <i>et al.</i> (2023)	Wasiq e Golroo (2024)
Periódico	<i>Transportation Research Record</i>	<i>International Journal of Pavement Research and Technology</i>
Nome e conceito do índice de circularidade	Índice de Circularidade do Material (ICM) aplicado a misturas asfálticas com rejeitos de minério de ferro	Índice Universal de Economia Circular para Pavimentação (IUCP) - propõe uma avaliação integrada dos impactos ambientais, custos operacionais e desempenho estrutural
Objetivo principal	Avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da substituição parcial do agregado fino por rejeitos de minério de ferro (IoT) em misturas asfálticas quentes	Desenvolver um índice de economia circular para um sistema de gerenciamento de pavimentos (PMS)
Base teórica	Fundamentado na economia circular, utilizando ICM e análise de viabilidade econômica pelo Valor Presente Líquido (VPL)	Fundamentado nos princípios da economia circular aplicados à infraestrutura viária, utilizando conceitos de sustentabilidade, análise de ciclo de vida (ACV) e gestão de pavimentos
Setor de aplicação	Engenharia de pavimentação, especialmente para misturas asfálticas sustentáveis com rejeitos de mineração	Infraestrutura rodoviária e sistemas de gerenciamento de pavimentos
Indicadores considerados	Índice de Circularidade do Material (ICM), desempenho mecânico (resistência à fadiga, deformação permanente), refletância solar e impacto ambiental	Proporção de materiais reciclados, custos operacionais, emissões de CO ₂ , desempenho estrutural das misturas asfálticas
Método de cálculo	Utilização do ICM conforme metodologia da <i>Ellen MacArthur Foundation</i> , adaptado para misturas asfálticas contendo rejeitos de minério de ferro	Modelo de avaliação multicritério baseado na ponderação de fatores ambientais, econômicos e técnicos
Critérios de ponderação	Consideração do desempenho estrutural, eficiência na reciclagem do material e impactos ambientais da substituição parcial de agregados por rejeitos minerais	Cada fator recebe um peso com base em sua importância relativa dentro do sistema de gerenciamento de pavimentos
Unidades de medida	Valores expressos em ciclos de carga (fadiga e deformação permanente), albedo (%), e índice adimensional para ICM	Toneladas de material reciclado por km de rodovia, custo por km, emissões de CO ₂ por km, desempenho estrutural medido em módulo de resiliência e fadiga
Fontes de dados	Ensaio laboratoriais realizados com misturas asfálticas contendo diferentes proporções de rejeitos de minério de ferro (7,5%, 10% e 12,5%)	Bases de dados ambientais, estudos de caso e literatura acadêmica sobre gerenciamento de pavimentos
Escopo dos dados	Avaliação em laboratório, considerando resistência mecânica, refletância solar e impactos econômicos e ambientais em diferentes composições de misturas	Dados históricos e modelagens aplicadas a diferentes cenários de pavimentação
Limitações de dados	Necessidade de validação em escala real e avaliação do impacto a longo prazo da durabilidade e estabilidade térmica das misturas	Necessidade de grande volume de dados operacionais e ambientais para aplicação robusta do índice
Materiais ou tecnologias avaliadas	Misturas asfálticas contendo rejeitos de minério de ferro como substituto parcial do agregado fino, com teores de 7,5%, 10% e 12,5%	Misturas asfálticas com diferentes teores de RAP e variação na incorporação de aditivos sustentáveis
Escala de aplicação	Ensaio laboratoriais com possibilidade de ampliação para testes em campo e implementação em projetos sustentáveis de pavimentação	Aplicação em sistemas de gerenciamento de pavimentos urbanos e rodoviários
Resultados obtidos	A mistura com 12,5% de IoT apresentou melhor desempenho mecânico, maior circularidade e redução de temperatura superficial do pavimento em 2,9°C	Demonstra que a aplicação de conceitos de economia circular pode otimizar a gestão de pavimentos, reduzindo custos e impactos ambientais
Impactos ambientais	Redução do consumo de agregados virgens, menor descarte de rejeitos de mineração e potencial de mitigação do efeito de ilhas de calor urbano	Redução das emissões de CO ₂ , menor extração de materiais virgens e aumento da vida útil das rodovias
Aspectos sociais e econômicos	Análise econômica mostrou que o uso de IoT pode reduzir custos de produção sem comprometer a qualidade estrutural das misturas asfálticas	Menor custo de manutenção e maior eficiência operacional na gestão de pavimentos
Limitações da sustentabilidade	Embora apresente benefícios ambientais e econômicos, a durabilidade a longo prazo e possíveis variações regionais na composição dos rejeitos precisam ser melhor avaliadas	Dificuldade na coleta de dados completos e necessidade de padronização metodológica
Validação experimental	Testes laboratoriais validados por meio de ANOVA e análise de significância estatística	Não foi realizada validação experimental direta, sendo o modelo baseado em análises

	dos parâmetros mecânicos	teóricas e modelagens computacionais
Reprodutibilidade	Metodologia pode ser replicada para outras misturas asfálticas, ajustando-se as proporções de IoT conforme disponibilidade regional	Requer adaptação dos parâmetros para diferentes contextos geográficos e disponibilidade de dados
Estudos comparativos	Comparação entre misturas asfálticas convencionais e aquelas contendo diferentes proporções de IoT, destacando ganhos em desempenho mecânico e sustentabilidade	Comparação com metodologias tradicionais de avaliação da sustentabilidade na pavimentação
Gaps mencionados	Necessidade de estudos em escala real para avaliar impactos de longo prazo e otimização dos processos de incorporação dos rejeitos na produção asfáltica	Necessidade de simplificação do índice para aplicação em locais com menor disponibilidade de dados
Recomendações futuras	Explorar a viabilidade em larga escala e desenvolver diretrizes normativas para o uso de rejeitos de mineração em pavimentação asfáltica	Explorar a implementação do índice em sistemas PMS reais e validar os resultados com estudos de campo
Especificidade para asfaltos	Metodologia desenvolvida especificamente para misturas asfálticas quentes, considerando desempenho mecânico e ambiental	Focado em pavimentos flexíveis, podendo ser adaptado para outras infraestruturas viárias
Potencial de adaptação	Pode ser adaptado para diferentes tipos de rejeitos minerais e misturas asfálticas, dependendo das condições geológicas e climáticas locais	Possível adaptação para diferentes condições climáticas e normativas
Requisitos normativos	Ainda não há padronização normativa para o uso de rejeitos de minério de ferro em misturas asfálticas, mas o estudo sugere possíveis direções para regulamentação	Ainda não há regulamentação específica para a aplicação do índice
Complexidade de aplicação	Processo requer ajustes na formulação e caracterização do IoT, mas pode ser integrado à produção asfáltica convencional com adaptações	Método exige a necessidade de integração de múltiplos fatores e coleta de dados extensiva
Custos associados	O custo de transporte do IoT pode ser um fator limitante, mas a redução do uso de agregados naturais compensa economicamente	Os custos variam conforme a disponibilidade de dados e a necessidade de ensaios laboratoriais adicionais
Resultados interpretáveis	Os resultados fornecem informações claras sobre a viabilidade técnica e ambiental, permitindo sua aplicação prática em projetos sustentáveis de pavimentação	O índice fornece uma visão holística da circularidade, mas pode exigir treinamento para sua correta interpretação

Os estudos analisados na *scoping review* revelam uma diversidade de abordagens para a mensuração da circularidade em misturas asfálticas, refletindo avanços no desenvolvimento de índices específicos para avaliar a sustentabilidade dos materiais asfálticos. Entretanto, uma análise comparativa detalhada dos métodos evidencia potencialidades e limitações que impactam a aplicabilidade desses índices tanto no meio acadêmico quanto na gestão prática de pavimentação.

Os artigos empregam diferentes estratégias para quantificação da circularidade, com destaque para o Índice de Circularidade do Material (ICM) e suas variações, além de indicadores complementares, como o *Environmental Sustainability and Circularity Indicator* (ESCi). O ICM tem sido utilizado para outros materiais, fundamentado na metodologia da *Ellen MacArthur Foundation* e adaptado para misturas asfálticas (da Costa *et al.*, 2024; Mantalovas; Di Mino, 2019). O ESCi, por sua vez, integra a avaliação de ciclo de vida (ACV) com a circularidade, proporcionando uma análise mais abrangente dos impactos ambientais e estruturais das misturas (Mantalovas; Di Mino, 2020).

As Tabelas 42, 43 e 44 evidenciam que os métodos adotados diferem nos critérios de ponderação, variáveis consideradas e níveis de aplicabilidade. Alguns estudos incorporam indicadores ambientais como pegada de carbono e eficiência energética (Corona *et al.*, 2022; Wasiq; Golroo, 2024), enquanto outros priorizam o fluxo de materiais residuais e resistência mecânica como base para definir a circularidade (de Medeiros Melo Neto *et al.*, 2022; de Moraes *et al.*, 2023). Embora a combinação desses fatores seja fundamental para uma análise holística, a ausência de padronização metodológica dificulta a comparabilidade entre os estudos e a replicabilidade dos índices em diferentes contextos geográficos e climáticos.

Os índices revisados apresentam contribuições importantes para a avaliação da circularidade na pavimentação. Estudos como o de Mantalovas e Di Mino (2020) e Costa *et al.* (2024) demonstram que a inclusão de fatores como resistência à fadiga, resistência à tração indireta, dano por umidade induzida e deformação permanente permite uma avaliação mais técnica da durabilidade das misturas recicladas. O emprego de RAP e aditivos, como óleo de algodão e zeólita, resultou em aumento da circularidade e melhoria no desempenho mecânico, conforme observado nos estudos de Melo Neto *et al.* (2022) e Mendes *et al.* (2023).

O ESCi se destaca por sua flexibilidade, podendo ser ajustado para diferentes composições e taxas de reciclagem, permitindo sua aplicação em diversos tipos de misturas

asfálticas. Além disso, as análises demonstram que misturas contendo elevados teores de RAP ($\geq 60\%$) apresentam índices de circularidade superiores, desde que não haja comprometimento estrutural (Mantalovas; Di Mino, 2020). Esse achado reforça a necessidade de equilibrar a sustentabilidade ambiental com a viabilidade técnica, garantindo que a longevidade das misturas não seja afetada pela reciclagem excessiva de materiais.

Apesar dos avanços, os métodos analisados apresentam limitações que comprometem sua implementação prática por gestores de infraestrutura. Índices como o ICM_{MAR} e $ESCi$ requerem um elevado número de ensaios mecânicos e ambientais, o que pode dificultar sua aplicação por órgãos gestores que não dispõem de infraestrutura laboratorial avançada. Esses estudos utilizam escalas e critérios variados para definir o ICM, dificultando a padronização e implementação em larga escala. Mendes *et al.* (2023) ressaltam que não há regulamentação específica para quantificação da circularidade em pavimentos, tornando os índices ainda limitados a estudos acadêmicos.

Mendes *et al.* (2023) indicam por meio do estudo de revisão (de Medeiros Melo Neto *et al.*, 2022; Mantalovas; Di Mino, 2019, 2020) que misturas com altos teores de RAP ($\geq 90\%$) podem apresentar menor resistência à fadiga, o que compromete sua durabilidade. Essa questão reforça a necessidade de balancear circularidade e desempenho mecânico.

A maioria dos estudos se baseia em dados laboratoriais e simulações, sem validação em condições reais de tráfego. Isso gera um *gap* na aplicabilidade dos índices, pois gestores de infraestrutura necessitam de métodos mais diretos e menos dependentes de modelagens complexas.

A análise comparativa dos estudos revela que a mensuração da circularidade em misturas asfálticas recicladas tem evoluído, incorporando indicadores ambientais, mecânicos e econômicos. O Índice de Circularidade do Material (ICM) é utilizado, mas apresenta variações metodológicas conforme os parâmetros considerados. Enquanto alguns estudos priorizam avaliações baseadas na fração de material reciclado e no desempenho mecânico das misturas, outros ampliam a abordagem para incluir impacto ambiental (pegada de carbono) e viabilidade econômica.

No entanto, observa-se que a maioria dos índices existentes não integra simultaneamente todos os aspectos essenciais da circularidade, limitando sua aplicabilidade na gestão de pavimentos rodoviários. Além disso, a falta de padronização metodológica entre os estudos dificulta comparações diretas, evidenciando a necessidade de um índice mais abrangente e aplicável na prática.

Diante dessas limitações, a proposição de um novo índice de circularidade deve considerar uma abordagem integrada e balanceada, combinando ICM, custos de produção e impacto ambiental, sem demandar modelagens complexas. Os achados indicam que a avaliação isolada da quantidade de material reciclado pode superestimar a circularidade, pois misturas com maior espessura de revestimento podem apresentar custos mais elevados e impacto ambiental ampliado, comprometendo sua viabilidade real.

O uso de métodos de dimensionamento avançados, como o MeDiNa, tem se mostrado eficaz na obtenção de análises mais precisas sobre a eficiência estrutural das misturas recicladas. Assim, a formulação de um índice integrado deve priorizar simplicidade operacional e rigor técnico, garantindo maior aplicabilidade para gestores da infraestrutura viária, além de fortalecer a transição para práticas sustentáveis na pavimentação.

Um índice de circularidade integrado deve conciliar viabilidade prática e rigor técnico, assegurando sua aplicação efetiva na gestão de pavimentos e não apenas em estudos acadêmicos. Para isso, é fundamental que: (i) a necessidade de ensaios laboratoriais extensivos seja minimizada, restringindo-se aos parâmetros essenciais para a avaliação estrutural e ambiental das misturas; (ii) os indicadores ambientais empregados sejam de fácil obtenção, como a pegada de carbono por tonelada de mistura e a redução no consumo de agregados virgens, evitando a necessidade de modelagens complexas; e (iii) aspectos econômicos e sociais sejam incorporados, permitindo que a avaliação da circularidade também contemple a viabilidade financeira e os impactos ao longo da cadeia produtiva.

Dessa forma, um novo índice deve equilibrar simplicidade operacional e robustez analítica, viabilizando sua implementação direta na gestão da infraestrutura rodoviária sem a dependência de ferramentas avançadas de modelagem.

6.2. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE CIRCULARIDADE (ICM) DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Conforme observado na subseção anterior (6.1.), os estudos que utilizaram o ICM na determinação do índice final de circularidade calcularam-no por meio da metodologia de Mantalovas e Di Mino (2019). Assim, inicialmente, para calcular o ICM, índice utilizado na literatura e adotado por outros pesquisadores, foram empregadas as metodologias de Mantalovas e Di Mino (2019) e Costa *et al.* (2024).

No entanto, a *Scoping Review* realizada revelou que, para a determinação do ICM, é essencial evitar a necessidade de ensaios laboratoriais extensivos, pois isso pode aumentar os custos associados à aquisição de dados e reduzir a efetividade do índice. Neste contexto, com o objetivo de avaliar a influência das variações nos ensaios mecânicos utilizados na definição do fator de utilidade (X), esta pesquisa implementou distintas abordagens metodológicas. A proposta consistiu em realizar uma análise comparativa entre os valores do ICM obtidos a partir de diferentes definições do fator de utilidade, discutindo-se suas implicações práticas no âmbito da engenharia de pavimentos.

6.2.1. METODOLOGIA EMPREGADA PARA CÁLCULO DO ICM

Esta subseção descreve os procedimentos metodológicos adotados para a determinação do Índice de Circularidade do Material (ICM) das misturas asfálticas, com base na aplicação e análise de diferentes abordagens para o fator de utilidade, além da validação do índice por meio de um grupo focal.

6.2.1.1. DETERMINAÇÃO DO FATOR DE UTILIDADE (X) E ICM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Para aprimorar a metodologia empregada nesta análise, o Índice de Circularidade do Material (ICM) foi determinado com base em treze abordagens distintas. Cada metodologia utilizou um fator de utilidade específico: (i) $[X^1]$, definido por Mantalovas e Di Mino (2019),

fundamentado nos ensaios de vida de fadiga e deformação permanente; (ii) $[X^2]$, adaptado por Costa *et al.* (2024), que incorpora os resultados de vida de fadiga, deformação permanente, resistência à tração indireta, desgaste Cântabro e resistência retida à tração indireta; e (iii) $[X^3$ a $X^{13}]$, desenvolvidos neste estudo, baseados em diferentes combinações de parâmetros mecânicos, permitindo avaliar a influência da escolha do fator de utilidade na determinação do ICM para misturas asfálticas.

A análise comparativa teve como objetivo aprimorar a efetividade e aplicabilidade do ICM na pavimentação asfáltica. Para isso, cada mistura analisada apresentou treze valores distintos de ICM, permitindo a identificação do fator de utilidade mais adequado à avaliação da circularidade. A realização dessa análise visou verificar quais ensaios mecânicos, isolados ou combinados, têm maior influência no cálculo do ICM. Além disso, a análise crítica não se limitou a avaliar o valor numérico, mas também considerou o contexto dos ensaios envolvidos, que de fato refletem a durabilidade e o desempenho técnico das misturas em campo, frente aos mecanismos de deterioração como tensão de tráfego, umidade e temperatura.

O fator de utilidade é obtido pelo produto dos desempenhos mecânicos quantificados. Nesta pesquisa, diferentes ensaios mecânicos foram adotados como parâmetros por refletirem propriedades fundamentais das misturas asfálticas. A Equação 23 apresenta a formulação utilizada para o cálculo do fator de utilidade, enquanto as Equações 24 a 29 detalham os cálculos específicos conforme o ensaio mecânico empregado na sua determinação, de acordo com o método proposto.

$$X = \prod_{i=1}^n [P_i] \quad (23)$$

$$P_{FTI} = \frac{FTI}{FTI_{av}} \quad (24)$$

$$P_{FN} = \frac{FN}{FN_{av}} \quad (25)$$

$$P_{RTI} = \frac{RTI}{RTI_{av}} \quad (26)$$

$$P_{RRTI} = \frac{RRTI}{RRTI_{av}} \quad (27)$$

$$P_{\%A} = \frac{\%A}{\%A_{av}} \quad (28)$$

$$P_{MR} = \frac{MR}{MR_{av}} (29)$$

Onde:

- FTI é o número médio de ciclos de carregamento antes da falha por fadiga para um nível de tensão de 40% (nível de tensão máximo, normalmente estabelecido pela norma DNIT 183 (2018), que possibilita a realização do ensaio em um tempo reduzido em comparação aos níveis de tensão inferiores);
- FTI_{av} é a vida útil média real de uma mistura asfáltica convencional para um nível de tensão de 40%;
- FN é o número médio de ciclos de carregamento antes de atingir um valor específico de profundidade de sulco;
- FN_{av} é o número equivalente de ciclos de carregamento de uma mistura asfáltica convencional antes de atingir o mesmo valor de profundidade de sulco;
- RTI é o número médio de resistência à tração da mistura asfáltica reciclada;
- RTI_{av} é o número médio de resistência à tração de uma mistura asfáltica convencional;
- $RRTI$ é o número médio de resistência retida à tração da mistura asfáltica reciclada;
- $RRTI_{av}$ é o número médio de resistência retida à tração de uma mistura asfáltica convencional;
- $\%A$ é o número médio de desgaste cântabro da mistura asfáltica reciclada;
- $\%A_{av}$ é o número médio de desgaste cântabro de uma mistura asfáltica convencional;
- MR é o número médio do módulo de resiliência da mistura asfáltica reciclada;
- MR_{av} é o número médio do módulo de resiliência de uma mistura asfáltica convencional.

A Tabela 45 apresenta os fatores de utilidade empregados na determinação do ICM para cada composição de mistura asfáltica, de acordo com os métodos adotados, bem como as equações utilizadas no cálculo do fator de utilidade.

Tabela 45 - Métodos e cálculos utilizados na determinação dos fatores de utilidade do ICM.

Fator de utilidade	Método	Equações Utilizadas	Cálculo para determinação	Ensaios Mecânicos Utilizados
X ¹	Mantalovas e Di Mino (2019)	Equações 24 e 25	$X^1 = \frac{FTI}{FTI_{av}} \times \frac{FN}{FN_{av}}$	Fadiga por Tração Indireta, <i>Flow Number</i>
X ²	Costa <i>et al.</i> (2024)	Equações 24 a 28	$X^2 = \frac{FTI}{FTI_{av}} \times \frac{FN}{FN_{av}} \times \frac{RTI}{RTI_{av}} \times \frac{RRTI}{RRTI_{av}} \times \frac{\%A}{\%A_{av}}$	Fadiga por Tração Indireta, <i>Flow Number</i> , Resistência à Tração Indireta, Razão da Resistência à Tração Indireta, Desgaste Cântabro
X ³	Proposta 1	Equações 24 a 29	$X^3 = \frac{FTI}{FTI_{av}} \times \frac{FN}{FN_{av}} \times \frac{RTI}{RTI_{av}} \times \frac{RRTI}{RRTI_{av}} \times \frac{\%A}{\%A_{av}} \times \frac{MR}{MR_{av}}$	Fadiga por Tração Indireta, <i>Flow Number</i> , Resistência à Tração Indireta, Razão da Resistência à Tração Indireta, Desgaste Cântabro, Módulo de Resiliência
X ⁴	Proposta 2	Equações 24, 26 e 29	$X^4 = \frac{FTI}{FTI_{av}} \times \frac{RTI}{RTI_{av}} \times \frac{MR}{MR_{av}}$	Fadiga por Tração Indireta, Resistência à Tração Indireta, Módulo de Resiliência
X ⁵	Proposta 3	Equações 24, 25, 26 e 29	$X^5 = \frac{FTI}{FTI_{av}} \times \frac{FN}{FN_{av}} \times \frac{RTI}{RTI_{av}} \times \frac{MR}{MR_{av}}$	Fadiga por Tração Indireta, <i>Flow Number</i> , Resistência à Tração Indireta, Módulo de Resiliência
X ⁶	Proposta 4	Equações 24, 25 e 26	$X^6 = \frac{FTI}{FTI_{av}} \times \frac{FN}{FN_{av}} \times \frac{RTI}{RTI_{av}}$	Fadiga por Tração Indireta, <i>Flow Number</i> , Resistência à Tração Indireta, Razão da Resistência à Tração Indireta
X ⁷	Proposta 5	Equações 24 e 26	$X^7 = \frac{FTI}{FTI_{av}} \times \frac{RTI}{RTI_{av}}$	Fadiga por Tração Indireta, Resistência à Tração Indireta
X ⁸	Proposta 6	Equações 26 e 29	$X^8 = \frac{RTI}{RTI_{av}} \times \frac{MR}{MR_{av}}$	Resistência à Tração Indireta, Módulo de Resiliência
X ⁹	Proposta 7	Equação 26	$X^9 = \frac{RTI}{RTI_{av}}$	Resistência à Tração Indireta
X ¹⁰	Proposta 8	Equação 24	$X^{10} = \frac{FTI}{FTI_{av}}$	Fadiga por Tração Indireta
X ¹¹	Proposta 9	Equação 25	$X^{11} = \frac{FN}{FN_{av}}$	<i>Flow Number</i>
X ¹²	Proposta 10	Equações 25 e 26	$X^{12} = \frac{FN}{FN_{av}} \times \frac{RTI}{RTI_{av}}$	<i>Flow Number</i> , Resistência à Tração Indireta
X ¹³	Proposta 11	Equações 24, 25, 26, 28 e 29	$X^{13} = \frac{FTI}{FTI_{av}} \times \frac{FN}{FN_{av}} \times \frac{RTI}{RTI_{av}} \times \frac{\%A}{\%A_{av}} \times \frac{MR}{MR_{av}}$	Fadiga por Tração Indireta, <i>Flow Number</i> , Resistência à Tração Indireta, Desgaste Cântabro, Módulo de Resiliência

Os parâmetros utilizados para a quantificação do ICM estão apresentados na Figura 53. O fator de utilidade foi calculado como o produto dos resultados dos ensaios mecânicos, conforme descrito nas Equações 23 a 29, de acordo com a metodologia adotada. Inicialmente, foram determinados treze fatores de utilidade para cada mistura asfáltica avaliada. Em seguida, os valores de ICM foram calculados considerando as diferentes metodologias (X^1 a X^{13}). Entre as misturas analisadas, aquela cujo ICM apresentou valor mais próximo de 1 foi classificada como a mais circular. A análise foi conduzida tanto dentro de cada metodologia quanto entre elas, visando identificar o método mais representativo e eficaz para a determinação do ICM.

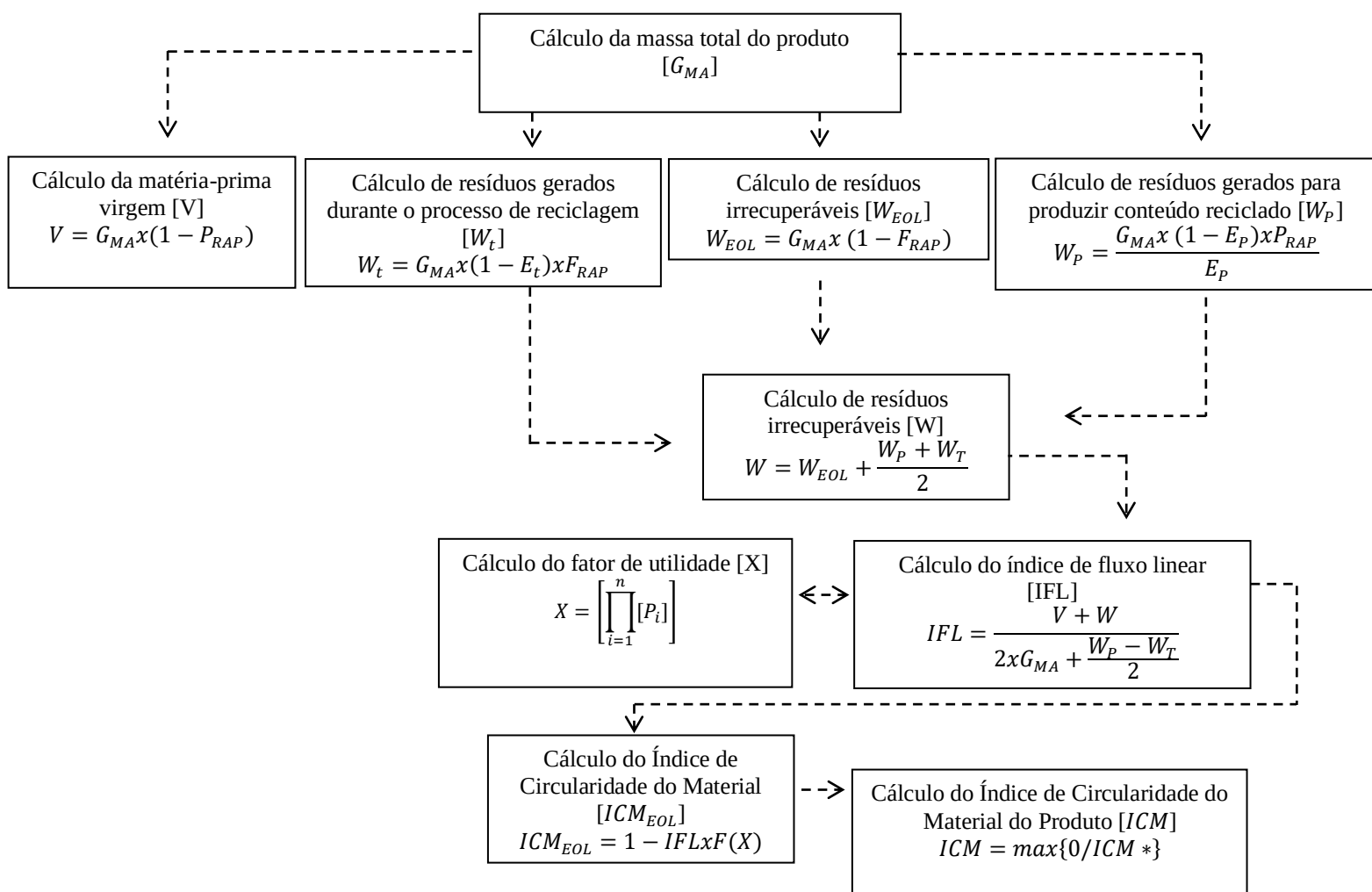


Figura 53 - Fluxograma para determinação do ICM das misturas asfálticas.

Fonte: Adaptado de Mantalovas e Di Mino (2020).

6.2.1.2. VALIDAÇÃO DO ICM (GRUPO FOCAL)

O método de Grupo Focal é amplamente utilizado para entender as diferentes percepções e atitudes em relação a um evento, prática, produto ou serviço. A principal característica desse método é a interação dinâmica entre os participantes e o pesquisador, visando à coleta de dados por meio de discussões direcionadas sobre tópicos específicos, o que justifica a sua denominação (Kniess; Penrose, 2021). Geralmente, o Grupo Focal é composto por 3 a 21 participantes, que são selecionados com base em características comuns relacionadas ao tema em estudo. A duração típica de uma sessão de grupo focal é de aproximadamente uma hora e meia (Nyumba *et al.*, 2018).

De maneira geral, os moderadores do grupo criam um ambiente adequado para que diversas percepções e pontos de vista sejam expressos, sem que haja qualquer pressão para que os participantes votem, alcancem um consenso ou formulem conclusões definitivas (Winke, 2017).

O grupo focal foi composto por seis participantes: três profissionais com atuação na indústria asfáltica (engenheiros civis, dos quais dois possuem título de doutor) e três docentes pesquisadores com titulação de doutor na área de pavimentação. A seleção dos participantes baseou-se na convergência de competências técnicas e na relevância temática para a pesquisa em desenvolvimento. Entre os participantes, dois eram oriundos do estado do Maranhão, três de Pernambuco e um da Paraíba. A sessão teve duração média de duas horas.

Dos treze ICMs definidos, um foi validado pelo painel de especialistas com base em sua aplicabilidade em larga escala e compatibilidade com as características do projeto que utiliza misturas asfálticas recicladas.

6.2.2. RESULTADOS E DISCUSSÕES DO ICM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Esta subseção apresenta os resultados, a discussão e a validação da determinação do Índice de Circularidade do Material (ICM) das misturas asfálticas, com base em diferentes metodologias de cálculo do fator de utilidade.

6.2.2.1. DETERMINAÇÃO DO FATOR DE UTILIDADE (X) E ICM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Para determinação do ICM, a massa do produto final (G_{MA}) foi determinada separadamente para cada tipo de mistura asfáltica, considerando as espessuras definidas pelo dimensionamento MeDiNa e a massa específica máxima medida (G_{mm}) correspondente a cada composição. O cálculo foi realizado para uma pista de rolamento com 7 metros de largura e 1 km de extensão, considerando as espessuras determinadas para cada mistura asfáltica: 21 cm para 0% RAP (0% BO), 19 cm para 15% RAP (0% BO), 13 cm para 56%RAP(3%BO), 12 cm para 63%RAP(5%BO) e 10 cm para 70%RAP(7%BO), conforme apresentado na subseção 4.3.2. do Capítulo 4. Com esses parâmetros, foi determinada a massa asfáltica necessária para pavimentar um quilômetro de rodovia, considerando as especificidades de cada composição, conforme apresentado na Tabela 46.

Tabela 46 - Massa asfáltica por composição de mistura asfáltica para pavimentar 1 km de rodovia.

Mistura Asfáltica	Gmm (kg/m ³)	Espessura (m)	Volume de asfalto (m ³)	G_{MA} = Massa (kg)
0%RAP (0%BO)	2.480	0,210	$V = 7 \times 1.000 \times 0,21 = 1.470$	$G_{MA} = 2.480 \times 1.470$ $G_{MA} = 3.645.600$
15%RAP (0%BO)	2.460	0,190	$V = 7 \times 1.000 \times 0,19 = 1.330$	$G_{MA} = 2.460 \times 1.330$ $G_{MA} = 3.271.800$
56%RAP (3%BO)	2.420	0,130	$V = 7 \times 1.000 \times 0,13 = 910$	$G_{MA} = 2.420 \times 910$ $G_{MA} = 2.202.200$
63%RAP (5%BO)	2.420	0,120	$V = 7 \times 1.000 \times 0,12 = 840$	$G_{MA} = 2.420 \times 840$ $G_{MA} = 2.032.800$
70%RAP (7%BO)	2.420	0,100	$V = 7 \times 1.000 \times 0,10 = 700$	$G_{MA} = 2.420 \times 700$ $G_{MA} = 1.694.000$

Nota: Gmm: massa específica máxima medida, G_{MA} : massa do produto final da mistura asfáltica reciclada.

A Tabela 47 apresenta os dados de entrada e saída utilizados no cálculo do ICM para as misturas asfálticas, considerando os diferentes métodos de determinação do fator de utilidade. No total, foram obtidos doze valores de ICM, possibilitando a avaliação da influência dos fatores de utilidade na obtenção de resultados semelhantes e, consequentemente, na classificação da circularidade das misturas asfálticas. Os valores detalhados empregados no cálculo dos 13 fatores de utilidade estão apresentados no Apêndice B deste estudo. A eficiência do processo de reciclagem do RAP adotado foi considerada como 100%, uma vez que, neste estudo, o material foi empregado em seu estado bruto, submetido apenas ao processo de britagem como forma de beneficiamento. Além disso, a eficiência do processo de reciclagem na fase de produção da mistura asfáltica foi considerada em 98%, levando em conta as perdas de material durante essa etapa (Costa *et al.*, 2024).

Tabela 47 - Dados de entrada e saída na determinação do ICM das misturas pelos distintos fatores de utilidade.

ICM das misturas		Símbolo	0%RAP (0%BO) Valores	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
Definição							
Massa de matéria-prima virgem usada (kg)		V	3645600,00	2781030,00	968968,00	752136,00	508200,00
Fração de matéria-prima derivada de fontes recicladas (%)		P _{RAP}	0,00	0,15	0,56	0,63	0,70
Massa do produto final (kg)		G _{MA}	3645600,00	3271800,00	2202200,00	2032800,00	1694000,00
Fração da massa do produto coletado por reciclagem no fim da vida (%)		F _{RAP}	0,00	0,15	0,56	0,63	0,70
Quantidade de resíduos que vai para aterro ou recuperação de energia (kg)		W _{EOL}	3645600,00	2781030,00	968968,00	752136,00	508200,00
Quantidade de resíduos gerados no processo de reciclagem (kg)		W _T	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Quantidade de resíduos gerados para produzir qualquer material reciclado contendo matéria-prima (kg)		W _P	0,00	10015,71	25168,00	26136,00	24200,00
Eficiência do processo de reciclagem como tratamento (%)		E _T	100				
Eficiência do processo de reciclagem como produção (%)		E _P	98				
Quantidade total de resíduos irrecuperáveis (kg)		W	3645600,00	2786037,86	981552,00	765204,00	520300,00
Índice de fluxo linear		IFL	1,00	0,85	0,44	0,37	0,30
Mantalovas e Di Mino (2019)	Fator de utilidade das misturas asfálticas		1,00	425,93	1448,90	2612,98	2283,67
	Fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas	X ¹	0,9000	0,0021	0,0006	0,0003	0,0004
	Índice de Circularidade do Material	ICM	0,1000	0,9982	0,9997	0,9999	0,9999
Costa et al. (2024)	Fator de utilidade das misturas asfálticas		1,00	114,44	449,25	985,48	984,42
	Fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas	X ²	0,9000	0,0079	0,0020	0,0009	0,0009
	Índice de Circularidade do Material	ICM	0,1000	0,9933	0,9991	0,9997	0,9997
Proposta 1	Fator de utilidade das misturas asfálticas		1,00	154,90	1065,83	1072,06	539,05
	Fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas	X ³	0,9000	0,0058	0,0008	0,0008	0,0017
	Índice de Circularidade do Material	ICM	0,1000	0,9951	0,9996	0,9997	0,9995
Proposta 2	Fator de utilidade das misturas asfálticas		1,00	64,00	77,74	128,92	118,40
	Fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas	X ⁴	0,9000	0,0141	0,0116	0,0070	0,0076
	Índice de Circularidade do Material	ICM	0,1000	0,9880	0,9949	0,9974	0,9977
Proposta 3	Fator de utilidade das misturas asfálticas		1,00	155,13	957,87	1249,92	818,60
	Fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas	X ⁵	0,9000	0,0058	0,0009	0,0007	0,0011

	Índice de Circularidade do Material	ICM	0,1000	0,9951	0,9996	0,9997	0,9997
Proposta 4	Fator de utilidade das misturas asfálticas		1,00	119,51	524,06	773,26	575,69
	Fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas	X ⁶	0,9000	0,0075	0,0017	0,0012	0,0016
	Índice de Circularidade do Material	ICM	0,1000	0,9936	0,9992	0,9996	0,9995
Proposta 5	Fator de utilidade das misturas asfálticas		1,00	49,31	42,53	79,76	83,27
	Fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas	X ⁷	0,9000	0,0183	0,0212	0,0113	0,0108
	Índice de Circularidade do Material	ICM	0,1000	0,9845	0,9907	0,9958	0,9967
Proposta 6	Fator de utilidade das misturas asfálticas		1,00	1,46	2,65	1,91	1,43
	Fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas	X ⁸	0,9000	0,6175	0,3402	0,4702	0,6274
	Índice de Circularidade do Material	ICM	0,1000	0,4751	0,8498	0,8251	0,8102
Proposta 7	Fator de utilidade das misturas asfálticas		1,00	1,12	1,45	1,18	1,01
	Fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas	X ⁹	0,9000	0,8016	0,6218	0,7600	0,8922
	Índice de Circularidade do Material	ICM	0,1000	0,3186	0,7254	0,7173	0,7301
Proposta 8	Fator de utilidade das misturas asfálticas		1,00	43,91	29,39	67,35	82,54
	Fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas	X ¹⁰	0,9000	0,0205	0,0306	0,0134	0,0109
	Índice de Circularidade do Material	ICM	0,1000	0,9826	0,9865	0,9950	0,9967
Proposta 9	Fator de utilidade das misturas asfálticas		1,00	2,42	12,32	9,70	6,91
	Fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas	X ¹¹	0,9000	0,3713	0,0730	0,0928	0,1302
	Índice de Circularidade do Material	ICM	0,1000	0,6843	0,9677	0,9655	0,9606
Proposta 10	Fator de utilidade das misturas asfálticas		1,00	2,72	17,83	11,48	6,97
	Fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas	X ¹²	0,9000	0,3307	0,0505	0,0784	0,1290
	Índice de Circularidade do Material	ICM	0,1000	0,7189	0,9777	0,9708	0,9610
Proposta 11	Fator de utilidade das misturas asfálticas		1,00	158,41	1091,29	1025,39	507,99
	Fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas	X ¹³	0,9000	0,0057	0,0008	0,0009	0,0018
	Índice de Circularidade do Material	ICM	0,1000	0,9952	0,9996	0,9997	0,9995

O fator de utilidade foi influenciado pela combinação de ensaios mecânicos considerados no cálculo. Diversas formulações foram avaliadas, priorizando, em sua maioria, a inclusão do ensaio de fadiga por tração indireta, uma vez que esse é o principal ensaio empregado no dimensionamento pelo método MeDiNa para a análise da porcentagem de área trincada ao final da vida útil do pavimento. A Tabela 48 apresenta os valores corrigidos dos fatores de utilidade, os quais foram diretamente utilizados no cálculo do ICM para todas as misturas asfálticas, de acordo com o método adotado.

Tabela 48 - Fatores de utilidade corrigidos utilizados no cálculo do ICM das misturas asfálticas.

Fator de Utilidade Corrigido	Métodos	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
X ¹	Mantalovas e Di Mino (2019)	0,9000	0,0021	0,0006	0,0003	0,0004
X ²	Costa <i>et al.</i> (2024)	0,9000	0,0079	0,0020	0,0009	0,0009
X ³	Proposta 1	0,9000	0,0058	0,0008	0,0008	0,0017
X ⁴	Proposta 2	0,9000	0,0141	0,0116	0,0070	0,0076
X ⁵	Proposta 3	0,9000	0,0058	0,0009	0,0007	0,0011
X ⁶	Proposta 4	0,9000	0,0075	0,0017	0,0012	0,0016
X ⁷	Proposta 5	0,9000	0,0183	0,0212	0,0113	0,0108
X ⁸	Proposta 6	0,9000	0,6175	0,3402	0,4702	0,6274
X ⁹	Proposta 7	0,9000	0,8016	0,6218	0,7600	0,8922
X ¹⁰	Proposta 8	0,9000	0,0205	0,0306	0,0134	0,0109
X ¹¹	Proposta 9	0,9000	0,3713	0,0730	0,0928	0,1302
X ¹²	Proposta 10	0,9000	0,3307	0,0505	0,0784	0,1290
X ¹³	Proposta 11	0,9000	0,0057	0,0008	0,0009	0,0018

O fator de utilidade corrigido foi determinado com base no fator de utilidade da mistura asfáltica de controle, calculado pela razão entre o valor padrão de 0,90 – utilizado para misturas asfálticas convencionais quando não há disponibilidade de dados de resistência à fadiga e à deformação permanente (Mantalovas; Di Mino, 2020) – e os fatores de utilidade das misturas asfálticas recicladas [X¹ a X¹³], obtidos por meio de ensaios de desempenho mecânico. A Figura 54 apresenta um gráfico ilustrando a variação dos fatores de utilidade entre os diferentes métodos para cada composição de mistura asfáltica.

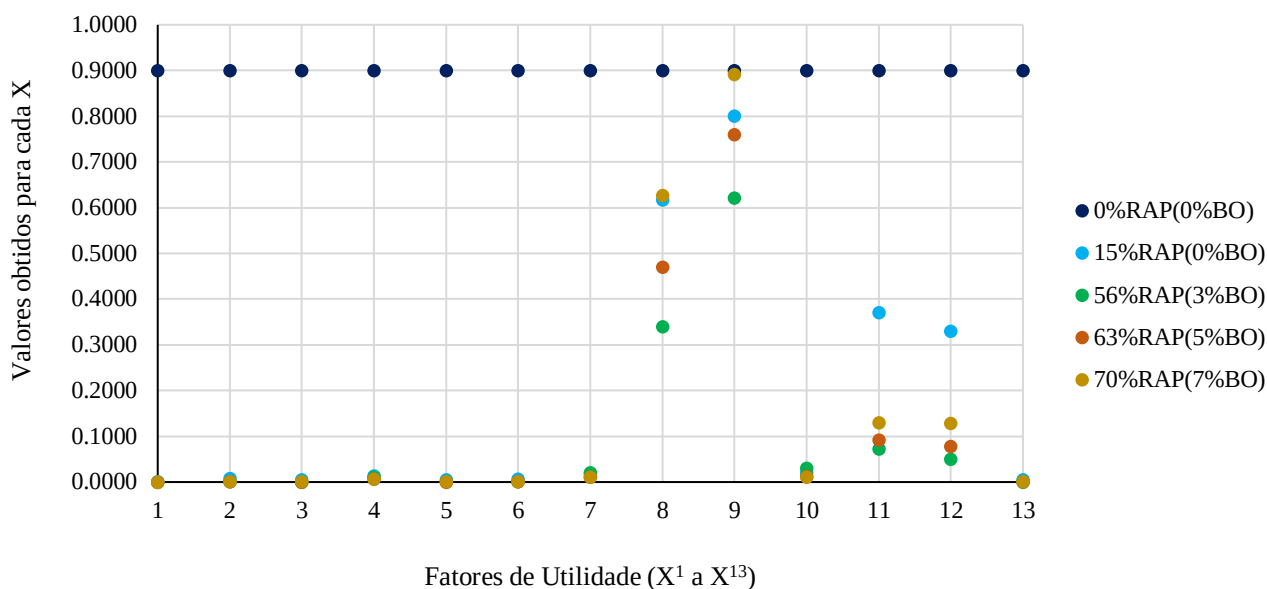


Figura 54 - Gráfico dos valores de fator de utilidade por composição de mistura asfáltica.

Conforme observado na Tabela 48 e na Figura 54, os fatores de utilidade X^1 , X^8 , X^9 , X^{11} e X^{12} apresentaram valores distintos dos demais sete fatores calculados. Esses fatores, que resultaram em valores mais elevados, não incorporaram o ensaio de fadiga por tração indireta em seu cálculo, com exceção do X^1 , que combinou fadiga com *flow number*, método pioneiro proposto por Mantalovas e Di Mino (2019). Esses resultados indicam que fatores de utilidade que não incluem o ensaio de fadiga por tração indireta apresentam menor representatividade, reforçando sua importância como parâmetro fundamental na determinação do fator de utilidade. Os fatores X^2 , X^3 e X^{13} foram os mais abrangentes, uma vez que o X^2 (da Costa *et al.*, 2024) considerou seis ensaios mecânicos convencionais, enquanto o X^3 e X^{13} utilizaram cinco. Do ponto de vista prático, a inclusão de um grande número de ensaios pode tornar a determinação do ICM inviável devido aos custos envolvidos, o que representa um fator crítico para a implementação em larga escala na gestão de pavimentos.

Para assegurar maior efetividade na determinação do ICM, é essencial utilizar um número reduzido de ensaios que ainda garantam representatividade tanto da utilidade quanto da circularidade da mistura asfáltica. Nesse contexto, o fator de utilidade X^2 , por exigir um grande número de ensaios mecânicos, apresentam baixa viabilidade prática. O fator X^{10} , que considera exclusivamente o ensaio de fadiga por tração indireta, já demonstra aplicabilidade.

No entanto, visando uma abordagem mais abrangente da utilidade da mistura asfáltica e considerando que a realização do ensaio de fadiga por tração indireta (FTI) exige previamente o ensaio de resistência à tração indireta (RTI), além de que o dimensionamento pelo método MeDiNa também requer os ensaios de módulo de resiliência (MR) e *flow number* (FN), o fator de utilidade X^5 se mostra mais adequado quando esse método de dimensionamento é adotado. Por outro lado, o fator X^7 , que considera os ensaios de RTI e FTI, se apresenta mais aplicável no dimensionamento empírico convencional do DNIT, voltado para rodovias de tráfego leve, nas quais não há solicitações significativas de carga pesada e a durabilidade da estrutura é menos sensível aos efeitos da fadiga induzida pela passagem frequente de veículos leves. Para avaliar o ICM em relação ao método de cálculo do fator de utilidade adotado para cada composição de mistura asfáltica, foi elaborado um gráfico de colunas, apresentado na Figura 55.

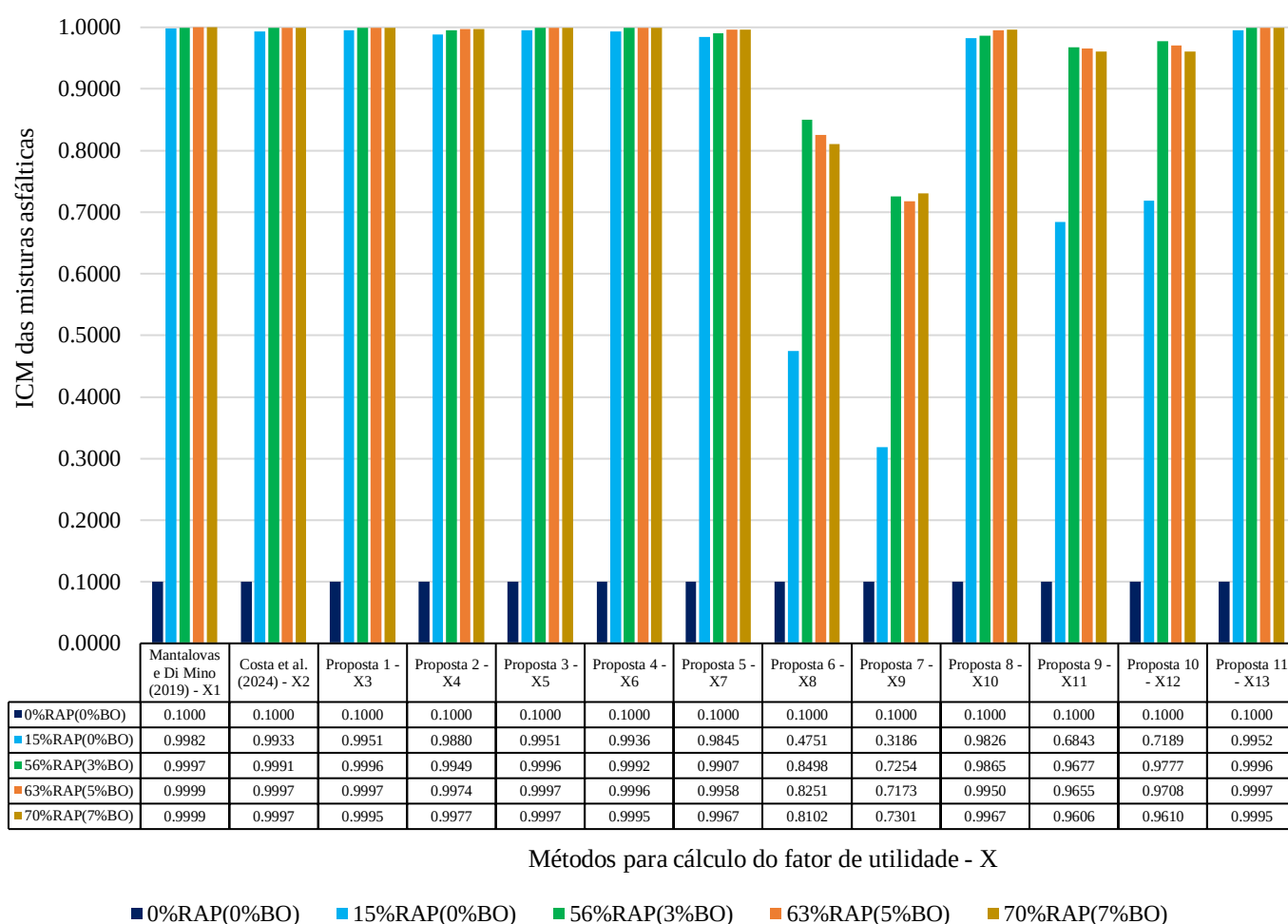


Figura 55 - ICM das misturas asfálticas.

Conforme ilustrado na Figura 55, as misturas recicladas apresentaram elevados índices de circularidade, com valores de ICM próximos a 1. Esse resultado se justifica pela incorporação de material reciclado (RAP) e pelo desempenho mecânico superior em relação à mistura asfáltica de controle. Embora a Tabela 34 apresente uma análise comparativa do desempenho mecânico entre as misturas, indicando equivalência estatística em grande parte dos ensaios, no cálculo do ICM os valores de entrada para a determinação do fator de utilidade são unitários. Isso resulta em razões mais próximas ou mais distantes de 1.

Observa-se que o ICM foi diretamente influenciado pelo fator de utilidade adotado. Os fatores X^8 , X^9 , X^{11} e X^{12} resultaram nos menores valores de ICM para todas as composições de misturas asfálticas recicladas, além de apresentarem uma tendência distinta dos demais. Isso se deve ao fato de que esses fatores de utilidade foram os únicos que não consideraram o ensaio de fadiga por tração indireta (FTI), tornando-se menos representativos. Esse resultado evidencia a importância desse ensaio na determinação do fator de utilidade e, conseqüentemente, do ICM.

Esse comportamento é coerente com a adaptação do ICM para misturas asfálticas, baseada na metodologia da Fundação *Ellen MacArthur*, na qual o fator de utilidade é determinado a partir do ensaio de vida de fadiga do produto. Observou-se um aumento na circularidade de 0% RAP até 56% RAP, seguido por uma redução para 63% e 70% de RAP nos valores de ICM calculados com os fatores de utilidade X^8 , X^9 , X^{11} e X^{12} .

Por outro lado, os demais fatores de utilidade indicaram uma tendência de aumento contínuo da circularidade à medida que a incorporação de RAP foi ampliada. Esse resultado corrobora os achados do estudo, nos quais os ensaios mecânicos demonstraram desempenho equivalente ou superior ao da mistura de controle, e a maior proporção de material residual teve um impacto positivo na determinação do ICM.

Melo Neto *et al.* (2022) também observaram um aumento no ICM com a incorporação de 40% de RAP em misturas asfálticas. Os autores relataram que, sem a adição de agente rejuvenescedor (ácido graxo da borra do óleo de soja), o ICM aumentou de 0,10 para 0,28, correspondendo a um incremento de 180%. Já para as misturas recicladas contendo 40% de RAP e 3% ou 5% de agente rejuvenescedor, os valores de ICM elevaram-se de 0,10 para 0,72 e 0,79, representando aumentos de 620% e 690%, respectivamente. Esse acréscimo mais expressivo foi atribuído ao fato de o agente rejuvenescedor também ser um material de

origem reciclada, além de promover melhorias no desempenho mecânico das misturas recicladas em comparação àquelas sem aditivo e à mistura de controle.

Costa *et al.* (2024) avaliaram misturas asfálticas recicladas contendo 15%, 25% e 33% de RAP, combinadas com 4%, 6% e 10% de óleo de algodão e 0,3% de zeólita. Os autores observaram que as misturas com maior teor de RAP e melhor desempenho mecânico apresentaram os mais altos índices de circularidade. Esses resultados indicam que, para uma mistura asfáltica ser considerada circular, é essencial a incorporação de materiais residuais, desde que essa adição não comprometa suas propriedades mecânicas. A redução no desempenho estrutural pode afetar a durabilidade da mistura, encurtando sua vida útil e, consequentemente, diminuindo sua utilidade e potencial de reaproveitamento ao longo do ciclo de vida do pavimento.

Mantalovas e Di Mino (2020) avaliaram misturas asfálticas recicladas com elevados teores de RAP (60% e 90%), sem a adição de agente rejuvenescedor. Os pesquisadores obtiveram valores de ICM de 0,83 e 0,82 para as misturas contendo 60% e 90% de RAP, respectivamente, enquanto a mistura de controle (sem RAP) apresentou um ICM de 0,10, indicando uma circularidade 730% e 720% inferior em comparação às misturas recicladas. No cálculo do fator de utilidade, os autores utilizaram apenas dois ensaios mecânicos (*flow number* e fadiga por tração indireta – FTI), sendo este último identificado neste estudo como o ensaio mecânico de maior influência na utilidade das misturas asfálticas, uma vez que representa a vida útil do material.

Esses resultados evidenciam que a incorporação de material reciclado impacta significativamente o índice de circularidade. No entanto, destaca-se a necessidade de uma abordagem mais abrangente na avaliação da circularidade, considerando parâmetros adicionais, como impacto ambiental e custos, para uma análise mais completa e representativa.

Zhang *et al.* (2025) avaliaram a circularidade de misturas asfálticas produzidas com escórias residuais de aço e ferro nos teores de 25%, 50%, 75% e 100%, em substituição ao agregado calcário, empregando indicadores de desempenho técnico, estimativas de custo baseadas no valor presente líquido e a determinação do Índice de Circularidade do Material (ICM) para viabilizar a utilização desses materiais. No entanto, os autores apenas reproduziram a metodologia de cálculo do ICM previamente adotada por Mantalovas e Di

Mino (2019), Melo Neto *et al.* (2022) e Costa *et al.* (2024), adaptando o fator de utilidade unicamente aos ensaios mecânicos realizados (resistência à tração indireta, dano por umidade e deformação permanente).

A ausência da consideração de dados referentes à vida de fadiga compromete a robustez da aplicação do ICM, uma vez que, conforme os princípios estabelecidos pelo índice da Fundação *Ellen MacArthur*, a durabilidade do produto é mensurada com base no número de ciclos até a falha por fadiga. Dessa forma, a inclusão de dados de vida de fadiga é essencial para uma determinação mais representativa e tecnicamente embasada do fator de utilidade.

No estudo conduzido por Zhang *et al.* (2025) a mistura asfáltica contendo 50% de escória de aço (SS) apresentou o maior índice de circularidade, enquanto a formulação com 75% de escória de ferro (IS) demonstrou desempenho semelhante ao da mistura convencional. Os autores indicaram que misturas com escória de aço tendem a apresentar maior circularidade em comparação àquelas com escória de ferro. A análise econômica confirmou a viabilidade de ambas as escórias como substituintes, com destaque para as misturas contendo escória de ferro, que apresentaram os menores custos de produção entre as formulações avaliadas.

A Tabela 49 apresenta a classificação das misturas asfálticas em termos de circularidade, conforme o método adotado para a determinação do fator de utilidade. Observa-se que as misturas recicladas 63%RAP(5%BO) e 70%RAP(7%BO) apresentaram maiores valores de ICM na maioria dos métodos de cálculo do fator de utilidade. No entanto, em consonância com as análises anteriores, os valores de ICM obtidos empregando os fatores de utilidade X^8 , X^9 , X^{11} e X^{12} se apresentaram menos realistas, resultando em variações consideráveis nas três primeiras posições de classificação entre as misturas avaliadas.

De maneira geral, as misturas 0%RAP(0%BO) e 15%RAP(0%BO) permaneceram entre as menos circulares, sendo a mistura de controle a de menor circularidade, seguida pela mistura contendo 15% de RAP. A mistura com 56% de RAP e 3% de BO posicionou-se como intermediária, enquanto as misturas 63%RAP(5%BO) e 70%RAP(7%BO) se destacaram como as mais circulares. A mistura 70%RAP(7%BO) ocupou a primeira posição sete vezes, a segunda posição uma vez e a terceira posição cinco vezes entre os treze valores de ICM. A mistura 63%RAP(5%BO) posicionou-se seis vezes em primeiro lugar, seis vezes em segundo lugar e uma vez em terceiro.

Tabela 49 - Classificação do ICM das misturas asfálticas em função do método de cálculo do fator de utilidade.

Misturas	X1		X2		X3		X4		X5		X6		
0%RAP(0%BO)	0.1000	4º	0.1000	4º	0.1000	5º	0.1000	5º	0.1000	4º	0.1000	5º	
15%RAP(0%BO)	0.9982	3º	0.9933	3º	0.9951	4º	0.9880	4º	0.9951	3º	0.9936	4º	
56%RAP(3%BO)	0.9997	2º	0.9991	2º	0.9996	2º	0.9949	3º	0.9996	2º	0.9992	3º	
63%RAP(5%BO)	0.9999	1º	0.9997	1º	0.9997	1º	0.9974	2º	0.9997	1º	0.9996	1º	
70%RAP(7%BO)	0.9999	1º	0.9997	1º	0.9995	3º	0.9977	1º	0.9997	1º	0.9995	2º	
Misturas	X7		X8		X9		X10		X11		X12		
0%RAP(0%BO)	0.1000	5º	0.1000	5º	0.1000	5º	0.1000	5º	0.1000	5º	0.1000	5º	
15%RAP(0%BO)	0.9845	4º	0.4751	4º	0.3186	4º	0.9826	4º	0.6843	4º	0.7189	4º	
56%RAP(3%BO)	0.9907	3º	0.8498	1º	0.7254	2º	0.9865	3º	0.9677	1º	0.9777	1º	
63%RAP(5%BO)	0.9958	2º	0.8251	2º	0.7173	3º	0.9950	2º	0.9655	2º	0.9708	2º	
70%RAP(7%BO)	0.9967	1º	0.8102	3º	0.7301	1º	0.9967	1º	0.9606	3º	0.9610	3º	
Misturas	X13												
0%RAP(0%BO)	0.1000	5º											
15%RAP(0%BO)	0.9952	4º											
56%RAP(3%BO)	0.9996	2º											
63%RAP(5%BO)	0.9997	1º											
70%RAP(7%BO)	0.9995	3º											
Legenda			Quantidade de vezes em cada colocação (1º, 2º, 3º, 4º e 5º) para os 13 ICMs										
	1º	7	6	3	0	0							
	2º	1	6	6	0	0							
	3º	5	1	4	3	0							
	4º	0	0	0	10	3							
	5º	0	0	0	0	10							
Misturas asfálticas			70%RAP (7%BO)	63%RAP (5%BO)	56%RAP (3%BO)	15%RAP (0%BO)	0%RAP (0%BO)						

A classificação das misturas asfálticas quanto à circularidade foi, em ordem decrescente: 70%RAP(7%BO), 63%RAP(5%BO), 56%RAP(3%BO), 15%RAP(0%BO) e, por último, a mistura de controle 0%RAP(0%BO). Assim, a mistura contendo 70% de RAP e 7% de BO apresentou o maior índice de circularidade, destacando-se pela elevada incorporação de material residual associada a um desempenho mecânico equivalente ou superior ao das demais formulações.

6.2.2.2. VALIDAÇÃO DO ICM (GRUPO FOCAL)

O Índice de Circularidade do Material (ICM) foi calculado com base em 13 metodologias distintas de fator de utilidade (X^1 a X^{13}). Dentre as alternativas avaliadas, o painel de especialistas selecionou, de forma unânime, o fator de utilidade que contemplasse os ensaios requeridos pelo método MeDiNa, incluindo resistência à tração indireta, fadiga por tração indireta, módulo de resiliência e *flow number* — este último, embora não utilizado na modelagem, foi considerado um critério de viabilidade com base no número N de tráfego, caracterizando o fator de utilidade X^5 .

Contudo, além dos ensaios anteriormente mencionados, os especialistas recomendaram a inclusão do ensaio de desgaste Cântabro, em razão da natureza do projeto, que envolve misturas asfálticas recicladas com elevados teores de RAP (>50%). Tal recomendação fundamentou a adoção do fator de utilidade X^{13} . Estudos anteriores (Yin *et al.*, 2017; Beserra Costa *et al.*, 2023b; Suzuki *et al.*, 2024) indicam que altos teores de RAP podem comprometer a resistência ao desgaste dessas misturas; contudo, a combinação adequada entre rejuvenescedor e teor de RAP pode otimizar esse desempenho.

Outro ponto destacado pelo painel de especialistas durante a sessão do grupo focal foi a inviabilidade de se indicar um único fator de utilidade, dentre os 13 avaliados, como solução universalmente mais eficaz. Os especialistas ressaltaram a necessidade de uma análise criteriosa quanto ao tipo de projeto e ao objetivo principal, uma vez que a adoção indiscriminada de um único fator pode resultar em implicações econômicas indesejadas, a depender do contexto. Como exemplo, foi citada a situação de rodovias com tráfego leve, cujos projetos ainda utilizam o método de dimensionamento do DNIT, o qual não exige uma

grande quantidade de ensaios laboratoriais. Nesses casos, o ensaio de fadiga foi considerado essencial, por avaliar o desempenho do material asfáltico sob tensões de tração — mecanismo comumente observado em pavimentos asfálticos e reconhecido como uma das principais formas de deterioração nas rodovias brasileiras.

Dessa forma, o único ensaio considerado obrigatório foi o de fadiga, uma vez que, conforme os preceitos da Fundação *Ellen MacArthur*, esse parâmetro está diretamente associado à vida útil do produto. Os demais ensaios empregados na determinação do fator de utilidade devem ser selecionados de forma criteriosa, considerando as especificidades de cada projeto rodoviário, o tipo de mistura asfáltica envolvida e as exigências estruturais correspondentes. O ICM utilizado na equação de cálculo do $IICS_{MAR}$ correspondeu ao obtido por meio do fator de utilidade X^{13} , sendo importante destacar que o ICM deve ser definido com base no fator que melhor representa as condições estruturais reais do projeto. Essa definição deve levar em conta, ainda, as faixas de temperatura e os níveis de tensão adotados na execução dos ensaios utilizados para a obtenção dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas.

6.3. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE INTEGRADO DE CIRCULARIDADE E SUSTENTABILIDADE PARA MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS ($IICS_{MAR}$)

Após a realização da *Scoping Review* sobre determinações de circularidade em misturas asfálticas, o mapeamento das metodologias utilizadas facilitou uma análise crítica do que vem sendo implementado e os “*gaps*” que precisam ser preenchidos na otimização desses índices. Com o objetivo de estabelecer um método padronizado para a determinação das alternativas mais viáveis de misturas asfálticas, esta pesquisa buscou desenvolver um novo Índice de Circularidade Integrado. A proposta é validar um índice que incorpore dados de desempenho mecânico obtidos por meio de ensaios laboratoriais e externalidades quanto ao aspecto ambiental e econômico sob a ótica da economia circular, visando otimizar as tomadas de decisões dos empreendedores do setor.

6.3.1. METODOLOGIA EMPREGADA NA DETERMINAÇÃO DO IICS_{MAR}

Esta subseção apresenta os indicadores e os respectivos pesos atribuídos na formulação do IICS_{MAR}, além do processo de validação do índice conduzido por meio de um painel de especialistas.

6.3.1.1. INDICADORES DO IICS_{MAR}

Com base na análise comparativa dos oito estudos incluídos na *Scoping Review* e na identificação dos elementos mais robustos e inovadores, propôs-se o Índice Integrado de Circularidade e Sustentabilidade para Misturas Asfálticas Recicladas (IICS_{MAR}). Esse índice foi desenvolvido com o objetivo de superar as limitações dos métodos existentes, integrando três dimensões essenciais: circularidade, custo e impacto ambiental. Dessa forma, busca-se proporcionar uma avaliação mais abrangente, viável e aplicável ao contexto da pavimentação. Para a determinação do IICS_{MAR}, foram considerados os seguintes indicadores:

- (i) Dimensão da circularidade: Na dimensão de circularidade, foi considerada a determinação do Índice de Circularidade do Material (ICM), com análise dos fatores de utilidade em função do projeto e dimensionamento da mistura asfáltica. Neste estudo, o ICM utilizado foi aquele obtido por meio do fator de utilidade X^{13} , conforme indicado pelo painel de especialistas.
- (ii) Dimensão de custos: Na dimensão de custos, adotaram-se os custos de produção das misturas asfálticas por quilômetro de rodovia, por serem mais representativos em comparação aos custos por tonelada de mistura, além de constituírem um dado econômico mais acessível, sem a necessidade de avaliações financeiras complexas, como o Valor Presente Líquido (VPL).
- (iii) Dimensão do impacto ambiental: Na dimensão do impacto ambiental, foi adotada a pegada de carbono como indicador. A escolha desse parâmetro fundamenta-se no aumento substancial das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera — especialmente dióxido de carbono, metano e óxido nitroso — que têm contribuído significativamente para o aquecimento global, elevando o nível do mar e

intensificando eventos climáticos extremos, como ondas de calor, secas prolongadas e tempestades severas (Junk *et al.*, 2013).

A crescente emissão de CO₂ tem se tornado um desafio ambiental crítico nos últimos anos, sendo um dos principais responsáveis pelo aquecimento global (Anwar *et al.*, 2019; Zimmermann, 2023). Diante disso, a redução dessas emissões é uma questão global premente, incentivando a implementação de medidas para mitigar seus impactos (Sathaye; Shukla; Ravindranath, 2006), como a transição para fontes de energia renováveis e a substituição dos combustíveis fósseis por energia limpa, como a eólica (Moomaw, 1996; Nunes, 2023).

Román e Kabir (2024) destacam que as emissões de CO₂ provenientes das atividades industriais representam uma preocupação significativa em razão de seus efeitos sobre o aquecimento global e as mudanças climáticas. De modo complementar, Yoro e Daramola (2020) enfatizam a urgência na adoção de estratégias de mitigação de CO₂ em setores industriais intensivos, como os de energia, cimento, ferro, aço e petroquímica, com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, a pegada de carbono foi incorporada ao IICS_{MAR}, visando uma avaliação mais abrangente que considere os impactos ambientais associados.

A escolha dos custos de produção foi partindo da premissa que os custos de manutenção e restauração são considerados equivalentes entre as misturas avaliadas, conforme demonstrado pelos ensaios de desempenho mecânico, que indicaram comportamento similar ou superior entre as opções disponíveis. Os valores médios de emissão de CO₂ associados à aquisição dos constituintes das misturas asfálticas são calculados com base na composição da mistura e podem ser obtidos por meio de bases de dados acessíveis a gestores da construção civil, como o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC, 2022) e o *Life Cycle Assessment of Asphalt Binder* (Asphalt Institute, 2019). Essa abordagem não demanda modelagens complexas por meio de softwares de ACV, tornando a aplicação do índice mais prática e acessível.

Admite-se que os processos de produção das misturas asfálticas avaliadas sejam equivalentes, sem variações significativas, o que viabiliza a simplificação do cálculo. Caso contrário, recomenda-se a realização de estudos ambientais mais detalhados, como a aplicação da ACV. O objetivo central do IICS_{MAR} é simplificar a determinação da circularidade das

misturas asfálticas, ao mesmo tempo em que incorpora parâmetros que ampliam a representatividade da economia circular no setor de pavimentação.

Os valores de ICM foram determinados na subseção 6.2.2.1. deste capítulo, enquanto os custos de produção por quilômetro de rodovia foram analisados no Capítulo 5 (subseção 5.5.). As emissões de CO₂ foram calculadas e apresentadas na Tabela 50. A massa de cada composição de mistura asfáltica por quilômetro de rodovia pavimentado foi estabelecida com base na massa específica máxima medida (Gmm) e na espessura das camadas dimensionadas segundo o método MeDiNa, conforme apresentado na Tabela 40 do Capítulo 5.

Os fatores de emissão de CO₂ para os agregados foram obtidos na base de dados do SIDAC referente ao ano de 2022, enquanto os valores para ligante asfáltico foram extraídos do documento do *Asphalt Institute* (2019). Já as emissões associadas ao RAP foram consideradas conforme os dados reportados por Chappat e Bilal (2003). Por outro lado, a produção de CO₂ por quilograma de óleo de babaçu não foi encontrada na literatura, razão pela qual foi adotado o valor referente à produção de óleo de algodão, conforme o estudo de Costa *et al.* (2024), dado que ambos os processos produtivos apresentam similaridades.

A Tabela 50 mostra que a mistura asfáltica com maior emissão de CO₂ na aquisição de materiais foi a mistura com 15%RAP(0%BO), devido ao seu maior consumo de ligante asfáltico e à maior espessura da camada de revestimento em relação às demais misturas recicladas, seguida pela mistura 0%RAP(0%BO). Em contrapartida, a menor emissão de CO₂ foi observada na mistura com 70%RAP(7%BO), que também apresentou o menor custo por quilômetro de rodovia. Esse melhor desempenho ambiental e econômico, aliado a um bom comportamento mecânico e a maior incorporação de material residual (70%RAP), sugere um elevado potencial de circularidade para essa mistura, o que deve ser validado pelo índice IICS_{MAR}.

Os custos de produção foram detalhados no Capítulo 5, considerando uma distância média de transporte de 50 km. Verificou-se que, mesmo ao ampliar essa distância para 100 km, o cenário de custos entre as misturas permaneceu inalterado, sendo a mais onerosa a mistura de controle (0% RAP e 0% BO) e a mais econômica aquela composta por 70% RAP e 7% BO.

Tabela 50 - Determinação das emissões de CO₂ por mistura asfáltica.

Constituintes da mistura	Traço de dosagem das misturas asfálticas (%)					
	0%RAP	15%RAP	56%RAP	63%RAP	70%RAP	
	(0%BO)	(0%BO)	(3%BO)	(5%BO)	(7%BO)	
Brita 19 mm (%)	14,29	14,33	9,65	11,58	12,55	
Brita 12,5 mm (%)	25,72	16,24	15,44	11,58	13,51	
Areia (%)	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00	
Pó de Pedra (%)	48,58	47,75	14,48	9,65	0,00	
Cal (%)	1,91	2,87	2,90	2,90	2,90	
Ligante Asfáltico Virgem (%)	4,75	4,50	3,40	3,33	3,26	
Óleo de Babaçu (%)	0,00	0,00	0,11	0,18	0,25	
RAP (%)	0,00	14,33	54,04	60,80	67,55	
Constituintes da mistura	Determinação das massas por constituinte por mistura (kg)					
Brita 19 mm (kg)	520865,10	468685,35	212512,30	235398,24	212512,30	
Brita 12,5 mm (kg)	937557,18	531176,73	340019,68	235398,24	228859,40	
Areia (kg)	173621,70	0,00	0,00	0,00	0,00	
Pó de Pedra (kg)	1770941,34	1562284,50	318768,45	196165,20	0,00	
Cal (kg)	69448,68	93737,07	63753,69	58849,56	49041,30	
Ligante Asfáltico Virgem (kg)	173166,00	147231,00	74764,69	67590,60	55139,70	
Óleo de Babaçu (kg)	0,00	0,00	2312,31	3557,40	4150,30	
RAP (kg)	0,00	468685,35	1190068,88	1235840,76	1144297,00	
Massa total para 1 km de rodovia (kg)	3645600,00	3271800,00	2202200,00	2032800,00	1694000,00	
Emissão de CO2 (kg)	Constituintes da mistura	Determinação da emissão de CO2 por mistura (kg)				
0,004669	Brita 19 mm (kg)	2,43E+03	2,19E+03	9,92E+02	1,10E+03	9,92E+02
0,004669	Brita 12,5 mm (kg)	4,38E+03	2,48E+03	1,59E+03	1,10E+03	1,07E+03
0,01251	Areia (kg)	2,17E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0,004669	Pó de Pedra (kg)	8,27E+03	7,29E+03	1,49E+03	9,16E+02	0,00E+00
0,947	Cal (kg)	6,58E+04	8,88E+04	6,04E+04	5,57E+04	4,64E+04
0,637	Ligante Asfáltico Virgem (kg)	1,10E+05	9,38E+04	4,76E+04	4,31E+04	3,51E+04
2,3989	Óleo de babaçu (kg)	0,00E+00	0,00E+00	5,55E+03	8,53E+03	9,96E+03
0,0008	RAP (kg)	0,00E+00	3,75E+02	9,52E+02	9,89E+02	9,15E+02
Total de Emissão de CO2 (kg)		1.93E+05	1.95E+05	1.19E+05	1.11E+05	9.45E+04

6.3.1.2. FORMULAÇÃO DO $IICS_{MAR}$

A formulação do $IICS_{MAR}$ foi estabelecida por meio de uma equação que integra variáveis técnicas, econômicas e ambientais, com pesos atribuídos a cada dimensão ajustados conforme diferentes cenários de análise, visando subsidiar simulações para a tomada de decisão. A Equação 30 apresenta o cálculo do $IICS_{MAR}$, incorporando parâmetros amplamente reconhecidos na literatura, como o Índice de Circularidade do Material (ICM) e a pegada de carbono.

$$IICS_{MAR} = \alpha x ICM + \beta x \left(\frac{C_{m\acute{a}x} - C_{atual}}{C_{m\acute{a}x} - C_{m\acute{i}n}} \right) + \gamma x \left(\frac{E_{m\acute{a}x} - E_{atual}}{E_{m\acute{a}x} - E_{m\acute{i}n}} \right) \quad (30)$$

Onde:

ICM : índice de circularidade da mistura asfáltica, determinado com base na metodologia proposta por Mantalovas e Di Mino (2019) e adaptado utilizando o fator de utilidade X^{13} , conforme apresentado e discutido na Subseção 6.2.2.2., em consonância com a recomendação do painel de especialistas;

$C_{m\acute{a}x}$: maior custo de produção por km de rodovia dentre as misturas avaliadas;

C_{atual} : custo de produção por km de rodovia da mistura asfáltica que está avaliada;

$C_{m\acute{i}n}$: menor custo de produção por km de rodovia dentre as misturas avaliadas;

$E_{m\acute{a}x}$: maior valor de emissão de CO_2 por km de rodovia dentre as misturas avaliadas;

E_{atual} : emissão de CO_2 por km de rodovia da mistura avaliada;

$E_{m\acute{i}n}$: menor valor de emissão de CO_2 por km de rodovia dentre as misturas avaliadas.

α : peso atribuído ao parâmetro ICM na equação;

β : peso atribuído ao parâmetro custo de produção na equação;

γ : peso atribuído ao parâmetro emissão de CO_2 na equação.

Os pesos atribuídos aos componentes do índice foram distribuídos de forma variável para avaliar o $IICS_{MAR}$ frente a essas variações. Foram consideradas quatro distribuições distintas: (i) $\alpha = 0,25$, $\beta = 0,5$ e $\gamma = 0,25$ (teste 1); (ii) $\alpha = 0,5$, $\beta = 0,25$ e $\gamma = 0,25$ (teste 2); (iii) $\alpha = 0,25$, $\beta = 0,25$ e $\gamma = 0,5$ (teste 3); e (iv) $\alpha = 1/3$, $\beta = 1/3$ e $\gamma = 1/3$ (teste 4). O teste 4 representa pesos iguais para cada índice da equação (indicando que as dimensões de circularidade, custos e impacto ambiental possuem o mesmo nível de importância). Por outro lado, os testes 1, 2 e 3 apresentam pesos tendenciosos, atribuindo maior ênfase a uma das dimensões (custos, circularidade e impacto ambiental, respectivamente), resultando em uma dimensão com importância dobrada em relação às demais.

Wasiq e Golroo (2024) realizaram uma análise considerando variações nos pesos atribuídos à formulação de um índice universal de economia circular aplicado à gestão de pavimentos. Foram adotadas duas categorias principais de ponderação: (i) “igualmente importante”, com pesos uniformes (0,33, 0,33, 0,33), e (ii) “tendenciosa”, composta pelos cenários (0,80, 0,10, 0,10), (0,10, 0,80, 0,10) e (0,10, 0,10, 0,80), para os testes 1, 2 e 3, respectivamente, considerando os coeficientes correspondentes às dimensões ambiental, financeira e de qualidade do pavimento. Os autores destacaram que os pesos da categoria tendenciosa poderiam ser representados por diversos conjuntos numéricos, porém a ampliação dessa análise ultrapassava os limites do escopo do estudo. Assim, a categoria “igualmente importante” foi fixada com pesos iguais.

Na Equação 30, o primeiro critério a ser atendido é que o desempenho mecânico das misturas alternativas se mantenha dentro dos limites estabelecidos pelas normas de desempenho. Caso esse requisito não seja atendido, as análises econômica e ambiental tornam-se irrelevantes. Em seguida, considerando que o ICM já incorpora a avaliação do desempenho mecânico e a proporção de material reciclado, a análise se expande para as outras dimensões: custos e impacto ambiental. A avaliação econômica direciona a escolha para a alternativa de menor custo de produção, enquanto a análise ambiental assegura a adoção de processos produtivos mais sustentáveis, favorecendo a transição para práticas alinhadas aos princípios da economia circular.

6.3.1.3. VALIDAÇÃO DO IICS_{MAR} (GRUPO FOCAL)

A validação do IICS_{MAR} seguiu procedimento análogo ao adotado para o ICM, conforme descrito no subitem 6.2.1.2. O processo foi conduzido por um painel de especialistas da área, que inicialmente avaliou a aplicabilidade dos 13 valores de ICM, resultantes da variação do fator de utilidade, conforme discutido na subseção 6.2.2.2., considerando as especificidades do projeto das misturas asfálticas recicladas. Em seguida, analisou-se a pertinência dos parâmetros inovadores incorporados — custos de produção e pegada de carbono por quilômetro de rodovia. Por fim, foram avaliados quatro cenários distintos de distribuição de pesos entre as dimensões consideradas, com o intuito de identificar a configuração mais representativa e aplicável ao contexto do estudo. Para isso, os valores do IICS_{MAR} obtidos em cada teste foram apresentados ao painel, de modo a subsidiar a seleção da alternativa mais viável para aplicação prática na tomada de decisão.

6.3.2. RESULTADOS E DISCUSSÕES DO IICS_{MAR} DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Este subitem apresenta os resultados, discussões e a validação do Índice Integrado de Circularidade e Sustentabilidade para Misturas Asfálticas Recicladas (IICS_{MAR}), com base em quatro cenários distintos de ponderação das três dimensões consideradas — circularidade, custos e pegada de carbono.

6.3.2.1. DETERMINAÇÃO DO IICS_{MAR} DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A Tabela 51 apresenta os valores de entrada e os resultados obtidos para o IICS_{MAR}, considerando a análise da variação em relação aos pesos atribuídos às dimensões técnica, econômica e ambiental nos diferentes cenários avaliados (Teste 1, Teste 2, Teste 3 e Teste 4).

Tabela 51 - Detalhamento dos cálculos de $IICS_{MAR}$ para as misturas asfálticas.

Teste 1 ($\alpha = 0,25$, $\beta = 0,5$ e $\gamma = 0,25$)				
Mistura asfáltica	ICM	R\$	CO ₂	$IICS_{MAR}$
0%RAP(0%BO)	0,1000	1.690.501,18	1,93E+05	0,0289
15%RAP(0%BO)	0,9951	1.381.812,01	1,95E+05	0,3739
56%RAP(3%BO)	0,9996	667.707,04	1,19E+05	0,8545
63%RAP(5%BO)	0,9997	584.795,90	1,11E+05	0,9059
70%RAP(7%BO)	0,9997	456.787,10	9,45E+04	0,9999
Teste 2 ($\alpha = 0,5$, $\beta = 0,25$ e $\gamma = 0,25$)				
Mistura asfáltica	ICM	R\$	CO ₂	$IICS_{MAR}$
0%RAP(0%BO)	0,1000	1.690.501,18	1,93E+05	0,0539
15%RAP(0%BO)	0,9951	1.381.812,01	1,95E+05	0,5601
56%RAP(3%BO)	0,9996	667.707,04	1,19E+05	0,8971
63%RAP(5%BO)	0,9997	584.795,90	1,11E+05	0,9318
70%RAP(7%BO)	0,9997	456.787,10	9,45E+04	0,9998
Teste 3 ($\alpha = 0,25$, $\beta = 0,25$ e $\gamma = 0,5$)				
Mistura asfáltica	ICM	R\$	CO ₂	$IICS_{MAR}$
0%RAP(0%BO)	0,1000	1.690.501,18	1,93E+05	0,0328
15%RAP(0%BO)	0,9951	1.381.812,01	1,95E+05	0,3113
56%RAP(3%BO)	0,9996	667.707,04	1,19E+05	0,8373
63%RAP(5%BO)	0,9997	584.795,90	1,11E+05	0,8897
70%RAP(7%BO)	0,9997	456.787,10	9,45E+04	0,9999
Teste 4 ($\alpha = 1/3$, $\beta = 1/3$ e $\gamma = 1/3$)				
Mistura asfáltica	ICM	R\$	CO ₂	$IICS_{MAR}$
0%RAP(0%BO)	0,1000	1.690.501,18	1,93E+05	0,0385
15%RAP(0%BO)	0,9951	1.381.812,01	1,95E+05	0,4151
56%RAP(3%BO)	0,9996	667.707,04	1,19E+05	0,8630
63%RAP(5%BO)	0,9997	584.795,90	1,11E+05	0,9091
70%RAP(7%BO)	0,9997	456.787,10	9,45E+04	0,9999

A Figura 56 ilustra graficamente os valores do $IICS_{MAR}$, facilitando a visualização das variações decorrentes da ponderação dos parâmetros na Equação 30. Nesta pesquisa, utilizou-se o ICM calculado com base no fator de utilidade X^{13} , em conformidade com os requisitos do método de dimensionamento e com a recomendação dos especialistas para misturas recicladas com elevados teores de RAP (>50%).

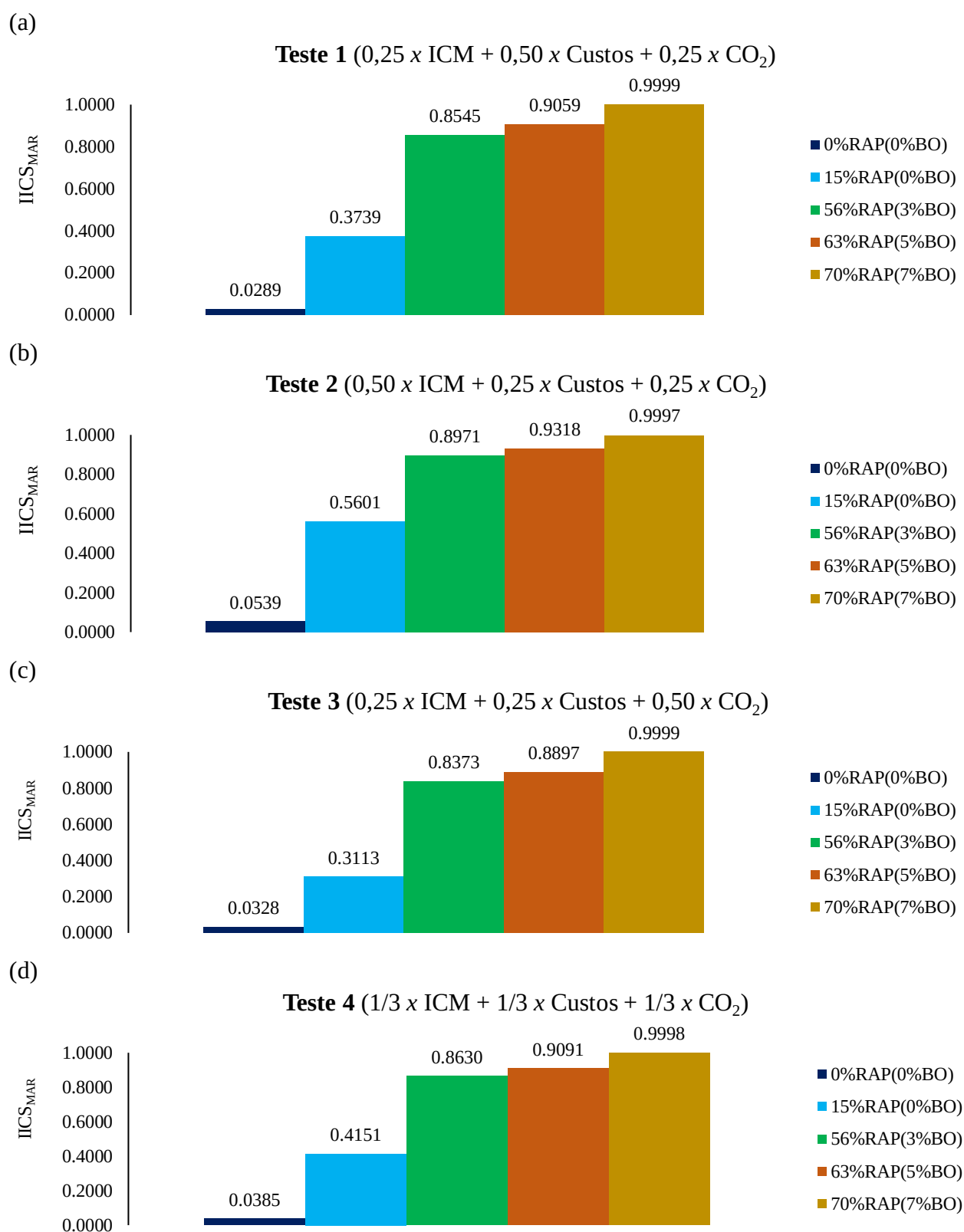


Figura 56 - Valores de IICS_{MAR} das misturas asfálticas em função dos pesos considerados.

Conforme ilustrado na Figura 56, os valores de $IICS_{MAR}$ apresentaram variações, mantendo, contudo, a mesma configuração de circularidade observada na análise baseada exclusivamente no ICM (subtópico 6.2.1.). No entanto, verificou-se que a mistura 15% RAP(0%BO) sofreu uma redução significativa na classificação de circularidade quando os parâmetros de custos e emissão de CO_2 foram incorporados à análise. Esse efeito decorre do elevado custo de produção por quilômetro de rodovia associado a essa mistura.

O dimensionamento estrutural da mistura 15%RAP(0%BO) demandou a segunda maior espessura do pavimento, resultando em um maior volume de massa asfáltica por quilômetro de rodovia. Consequentemente, seu custo total por km de rodovia foi superior ao das demais misturas recicladas, impactando negativamente sua classificação de circularidade. Como resultado, o valor do ICM da mistura caiu de 0,9951 para 0,4151 no Teste 4 do $IICS_{MAR}$, no qual foram considerados pesos equivalentes para as três dimensões: circularidade, custos e impacto ambiental.

A Tabela 52 apresenta os percentuais de variação — redução ou aumento — no índice de circularidade das misturas asfálticas em relação ao ICM, considerando-se adicionalmente as dimensões de custos e pegada de carbono nos quatro testes analisados, os quais diferem quanto à distribuição dos pesos atribuídos às três dimensões: circularidade, custos e pegada de carbono.

Tabela 52 - Variação percentual dos valores de $IICS_{MAR}$ em relação ao ICM.

Misturas Asfálticas	$IICS_{MAR}$ (Teste 1)	$IICS_{MAR}$ (Teste 2)	$IICS_{MAR}$ (Teste 3)	$IICS_{MAR}$ (Teste 4)
0%RAP(0%BO)	-71,09%	-46,09%	-67,19%	-61,46%
15%RAP(0%BO)	-62,43%	-43,72%	-68,72%	-58,29%
56%RAP(3%BO)	-14,52%	-10,26%	-16,24%	-13,67%
63%RAP(5%BO)	-9,38%	-6,79%	-11,00%	-9,06%
70%RAP(7%BO)	+0,05%	+0,04%	+0,05%	+0,04%

Conforme demonstrado na Tabela 52, a comparação entre os índices ICM e $IICS_{MAR}$ revelou, na maioria dos casos, uma redução nos valores de circularidade das misturas asfálticas quando consideradas simultaneamente as dimensões de circularidade, custos e pegada de carbono. Esse resultado evidencia que avaliações baseadas exclusivamente no fluxo de materiais residuais e no desempenho mecânico tendem a superestimar o real grau de circularidade das misturas. As maiores reduções foram verificadas nas misturas com menor

teor de RAP — especificamente nas formulações 0%RAP(0%BO) e 15%RAP(0%BO). A única mistura que manteve estabilidade nos índices de circularidade foi a 70%RAP(7%BO), permanecendo como a mais circular em todos os testes analisados. No Teste 1, onde o custo recebeu peso dobrado, a maior redução foi observada para a mistura 0%RAP(0%BO), com decréscimo de 71,09%, seguida pelas misturas 15%RAP(0%BO) (62,43%), 56%RAP(3%BO) (14,52%) e 63%RAP(5%BO) (9,38%). A mistura 70%RAP(7%BO) apresentou comportamento estável, sem variação significativa.

6.3.2.2. VALIDAÇÃO DO IICS_{MAR} (GRUPO FOCAL)

No que se refere à variação dos pesos atribuídos aos coeficientes da equação do IICS_{MAR}, o grupo de especialistas ressaltou que a definição desses valores deve ser guiada pelos objetivos específicos do projetista ou pesquisador. Quando uma determinada dimensão for considerada prioritária no processo decisório, recomenda-se que o responsável atribua os respectivos pesos aos coeficientes da equação, os quais devem ser explicitados no memorial descritivo do índice, acompanhados da justificativa técnica correspondente. No presente estudo, o painel de especialistas reunido no grupo focal recomendou, de forma unânime, a atribuição de peso 0,50 à dimensão técnica (ICM), relacionada ao desempenho mecânico e à incorporação de material residual, e pesos de 0,25 às dimensões econômica (custo) e ambiental (emissões de CO₂).

Diante do exposto, observa-se uma tendência por parte dos profissionais da área de pavimentação em atribuir maior relevância ao desempenho mecânico em comparação às dimensões econômicas e ambientais, ao considerar os pesos dos três pilares avaliados — desempenho mecânico, custos e impacto ambiental. Essa inclinação reflete uma abordagem técnica mais tradicional, compreensível à luz da importância da durabilidade e funcionalidade das rodovias, que dependem diretamente de um desempenho mecânico adequado. Contudo, para fins de cálculo do IICS_{MAR}, é fundamental que as alternativas de misturas propostas apresentem viabilidade técnica comprovada, uma vez que, sem essa condição, sua aplicação prática se torna inviável. Mesmo diante do desempenho técnico satisfatório de todas as misturas avaliadas, os especialistas demonstraram preferência por atribuir maior peso à

dimensão relacionada ao ICM, em detrimento das demais variáveis — custo por quilômetro de rodovia e emissões de CO₂.

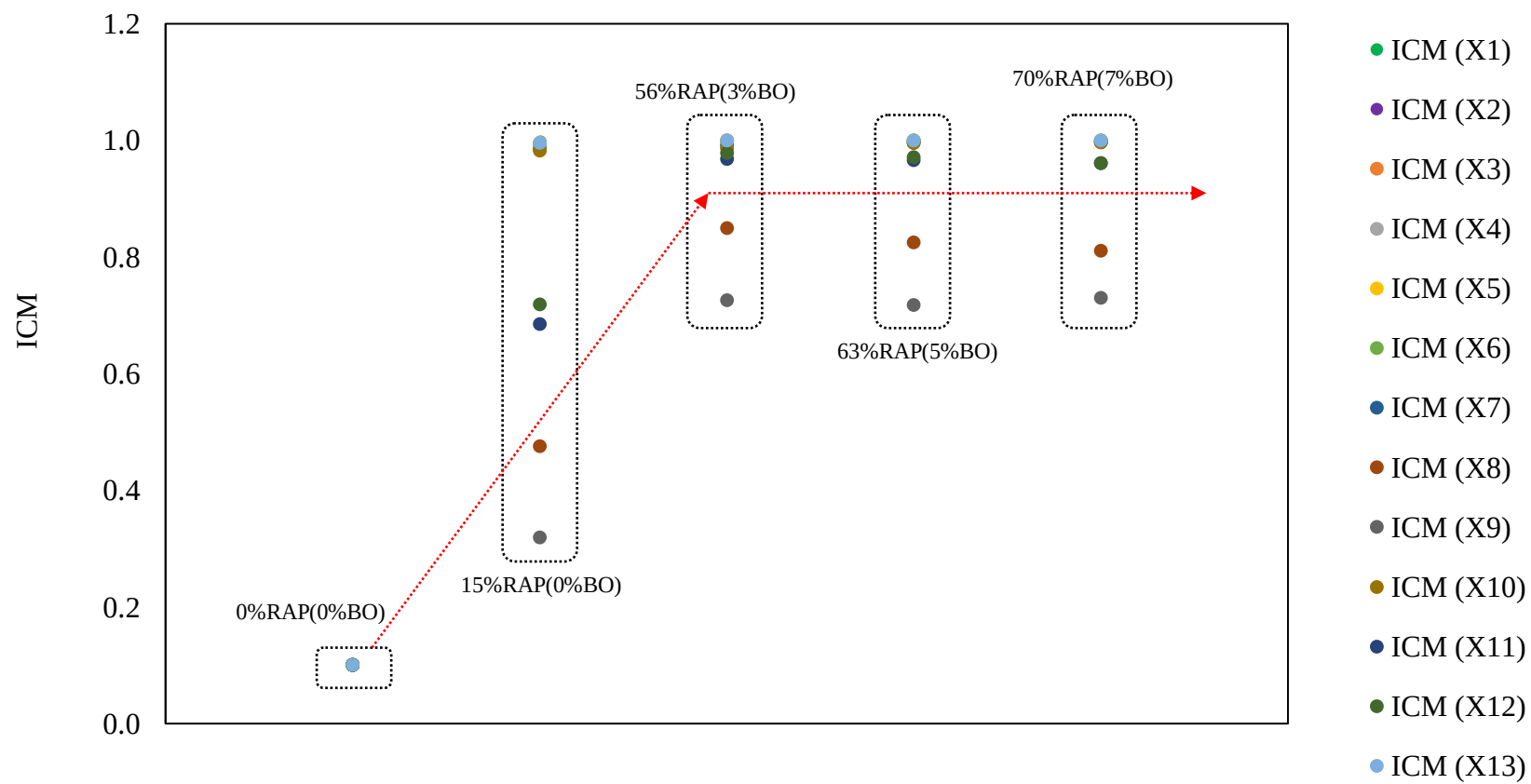
Portanto, considerando os cenários analisados e as características específicas das misturas asfálticas recicladas avaliadas, o índice IICS_{MAR} resultante da configuração adotada no Teste 2 mostrou-se o mais adequado para subsidiar o processo de tomada de decisão. Nessa abordagem, foram atribuídos pesos de 0,5 para a dimensão ICM e 0,25 para as dimensões de custo por quilômetro de rodovia e emissões de CO₂, respectivamente. Tal ponderação refletiu uma priorização equilibrada entre o desempenho circular dos materiais e os demais critérios de sustentabilidade, respeitando as particularidades do contexto técnico e a viabilidade de implementação. Assim, reforça-se a importância de uma estrutura metodológica flexível, capaz de se adaptar às demandas específicas de cada projeto, sem negligenciar os princípios da economia circular e do desenvolvimento sustentável.

6.4. SÍNTESE ACERCA DO ICM E IICS_{MAR} DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A Figura 57 apresenta os valores de ICM e IICS_{MAR} para as misturas asfálticas, além da variação dos índices conforme o método de cálculo da circularidade. Os valores de ICM (Figura 57 (a)) apresentam uma tendência distinta em relação aos valores de IICS_{MAR} (Figura 57 (b)). O índice ICM demonstra um aumento progressivo desde a mistura 0%RAP(0%BO) até a mistura 56%RAP(3%BO), estabilizando-se nas misturas 63%RAP(5%BO) e 70%RAP(7%BO).

Essa tendência sugere que a mistura de controle foi considerada a menos circular, seguida da mistura 15%RAP(0%BO) como uma alternativa intermediária, enquanto as misturas recicladas com maior teor de RAP foram classificadas como as mais circulares. Entretanto, essa interpretação pode ser influenciada pelo fato de o ICM não considerar os aspectos econômicos e ambientais, o que é evidenciado pela divergência nos valores de IICS_{MAR}.

(a)



(b)

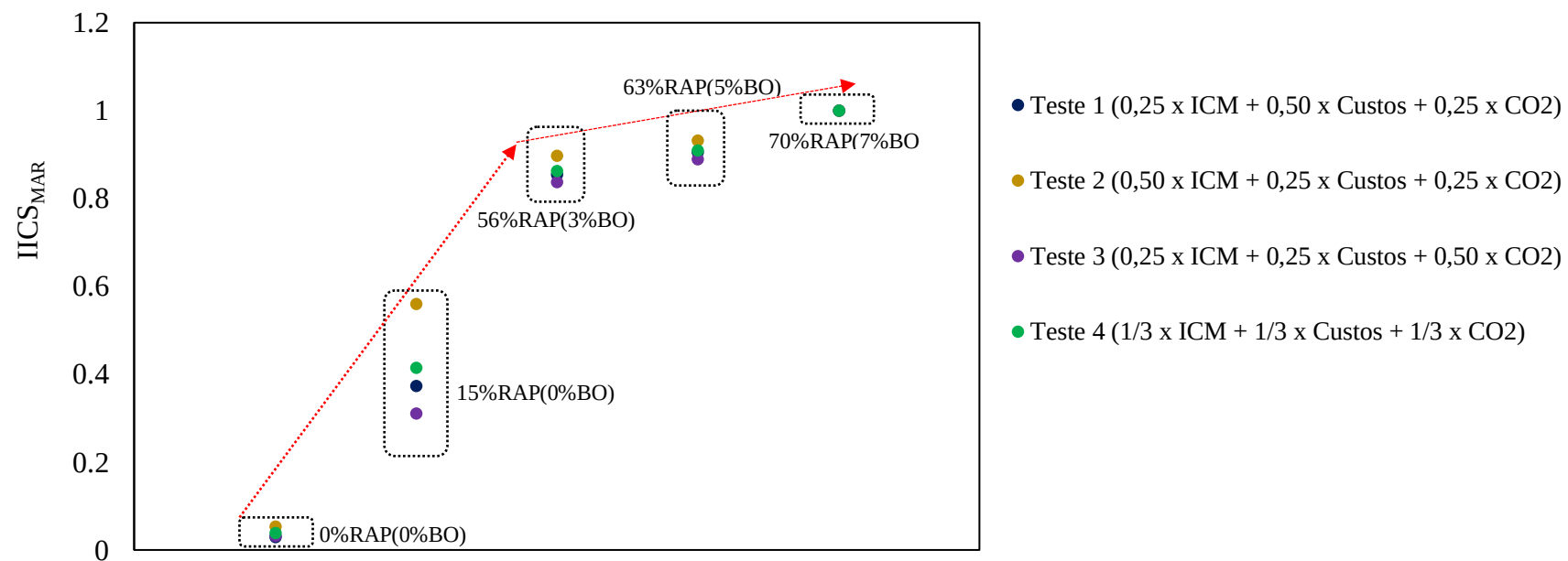


Figura 57 - Valores de ICM e $IICS_{MAR}$ das misturas asfálticas em função da metodologia de cálculo adotada.

Na Figura 57(b), observou-se uma tendência de aumento dos valores de $IICS_{MAR}$ da mistura 0%RAP(0%BO) até 70%RAP(3%BO). Esse comportamento evidencia que o índice $IICS_{MAR}$ foi sensível às variações de circularidade entre as misturas recicladas com altos teores de RAP (>50%), destacando diferenças não perceptíveis no índice ICM. Neste cenário, a mistura com maior teor de RAP apresentou simultaneamente o melhor desempenho mecânico, maior incorporação de material residual, menor custo e menores emissões de CO₂. No entanto, caso essa mistura demandasse uma espessura maior da camada de revestimento, os custos e as emissões poderiam ser elevados, resultando em um cenário distinto de circularidade.

Assim, o ICM tende a supervalorizar a circularidade ao considerar apenas o fluxo de entrada de materiais residuais e o desempenho mecânico, sem contemplar fatores econômicos e ambientais. Enquanto o ICM indicava circularidade equivalente para as misturas com maiores teores de RAP (56%, 63% e 70%), o $IICS_{MAR}$ revelou diferenças mais expressivas, classificando a mistura 70%RAP(7%BO) como a mais circular, seguida pela 63%RAP(5%BO) e, por fim, a 56%RAP(3%BO).

Gholami *et al.* (2025) propuseram um índice de circularidade baseado nos princípios fundamentais do ICM convencional. No entanto, os autores exploraram diferentes cenários para a determinação do fator de utilidade, empregando distintos ensaios mecânicos conduzidos em variadas temperaturas. Adicionalmente, incorporaram ao cálculo do fator de utilidade os custos de produção e as emissões de CO₂ associadas à fabricação de misturas asfálticas recicladas rejuvenescidas com teores de 0%, 35%, 50% e 65% de RAP. O cálculo relativo aos custos e às emissões de CO₂ foi realizado com base em razões inversas proporcionais, análogas às aplicadas aos dados de desempenho mecânico.

Embora o índice proposto por Gholami *et al.* (2025) represente um avanço conceitual, sua efetividade prática não foi avaliada, o que compromete sua aplicabilidade em contextos reais de projeto e gestão de pavimentos. A inclusão de numerosos ensaios – especialmente não convencionais – pode inviabilizar sua adoção por projetistas e gestores públicos ou privados. É essencial que os ensaios utilizados para o cálculo do fator de utilidade estejam alinhados com os tradicionalmente adotados nos processos de dimensionamento e manutenção de pavimentos, garantindo compatibilidade com a prática de engenharia. A utilização exclusiva do custo por tonelada, sem considerar o desempenho mecanicista das

misturas, pode induzir a conclusões equivocadas, uma vez que o comportamento mecânico influencia diretamente a espessura da camada e, por consequência, o custo por quilômetro de rodovia. Além disso, a ausência de validação formal do índice limita sua confiabilidade, sendo recomendável a aplicação de metodologias robustas como o método Delphi ou a técnica de Grupo Focal, com participação de especialistas do meio acadêmico e industrial, para assegurar fundamentação técnica e consenso multidisciplinar.

As análises indicam que a formulação do IICS_{MAR} oferece uma abordagem mais abrangente e sensível à complexidade inerente ao projeto de misturas asfálticas recicladas, ao integrar, de forma simultânea, os aspectos técnicos, econômicos e ambientais. As variações nos fatores de utilidade — especialmente na dimensão de circularidade — e as diferentes atribuições de pesos entre as três dimensões avaliadas evidenciam a capacidade do índice em distinguir alternativas de projeto que, sob a ótica do ICM, apresentavam desempenhos semelhantes. Essas variações demonstram que o resultado final do índice é consideravelmente influenciado pelas prioridades definidas pelo gestor, ressaltando a importância da flexibilidade metodológica para adaptação a distintos contextos decisórios. Dessa forma, o IICS_{MAR} consolida-se como uma ferramenta estratégica de apoio à decisão, ao possibilitar a seleção de soluções mais sustentáveis e custo-efetivas, alinhadas aos objetivos específicos de cada projeto e às diretrizes contemporâneas de desempenho e sustentabilidade na gestão de pavimentos.

6.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação da circularidade considerando os aspectos de reciclagem, desempenho mecânico, custos de produção e impacto ambiental (pegada de carbono) em misturas asfálticas com incorporação de RAP e óleo de babaçu levou às seguintes conclusões:

- (1) A circularidade das misturas asfálticas recicladas é influenciada não apenas pela incorporação de materiais residuais, mas também por seu desempenho estrutural, custos de produção e pegada de carbono.
- (2) Misturas com altos teores de RAP e óleo de babaçu apresentaram maior circularidade, evidenciando o potencial desses materiais na pavimentação sustentável.

- (3) A mistura contendo 70% RAP e 7% óleo de babaçu apresentou os maiores índices de circularidade, enquanto a mistura de controle (0% RAP e 0% BO) obteve a menor circularidade.
- (4) A *scoping review* identificou oito estudos relevantes sobre índices de circularidade na pavimentação, porém nenhum deles integra simultaneamente os parâmetros técnicos, econômicos e ambientais de forma equilibrada.
- (5) A análise revelou que a avaliação isolada de desempenho mecânico e quantidade de material reciclado pode superestimar a circularidade, sendo necessária uma abordagem mais abrangente.
- (6) Os fatores de utilidade que não consideraram a vida de fadiga das misturas asfálticas não se mostraram representativos.
- (7) Os ensaios mecânicos adotados para o cálculo do fator de utilidade no ICM foram definidos com base no método de dimensionamento empregado. Para misturas asfálticas dimensionadas pelo método MeDiNa, é imprescindível a consideração dos ensaios de fadiga por tração indireta, *flow number*, resistência à tração indireta e módulo de resiliência, uma vez que estes compõem a base do dimensionamento mecanístico-empírico. Em casos de misturas com elevados teores de RAP (>30%), recomenda-se a inclusão do ensaio de desgaste Cantabro, a fim de ampliar a avaliação da durabilidade superficial. Para misturas dimensionadas segundo o método empírico do DNIT, a definição do fator de utilidade requer apenas os resultados dos ensaios de resistência à tração indireta e fadiga por tração indireta.
- (8) A adoção de um índice de circularidade integrado contribui para uma melhor tomada de decisão na escolha de misturas asfálticas sustentáveis, reduzindo impactos ambientais e custos.
- (9) A atribuição de pesos de 0,50 para o ICM e 0,25 para custos e pegada de carbono se mostra mais representativa para especialistas da área na avaliação da circularidade.
- (10) Os achados reforçam a importância da economia circular na pavimentação, promovendo maior eficiência no uso de recursos e prolongando a vida útil dos pavimentos.

CAPÍTULO 7

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas por meio da realização dessa pesquisa, bem como sugestões para pesquisas futuras envolvendo o mesmo objeto de estudo.

7. CONCLUSÕES

A análise do uso do óleo de babaçu como agente rejuvenescedor em misturas asfálticas recicladas revelou conclusões notáveis sobre seus efeitos e implicações potenciais:

- (1) A incorporação de óleo de babaçu ao ligante asfáltico com penetração 50/70 resultou em redução da rigidez, evidenciada pela diminuição da viscosidade e da temperatura de desempenho (PG). Ligantes contendo 7%, 10% e 12% de óleo de babaçu demonstraram potencial para aplicação em misturas asfálticas mornas, com temperaturas finais de produção variando entre 150 °C e 141 °C, promovendo alternativas mais sustentáveis aos processos convencionais de pavimentação. Observou-se maior susceptibilidade à deformação permanente em ligantes com teores mais elevados de óleo, especialmente em temperaturas elevadas. No entanto, todas as formulações atenderam aos critérios de desempenho estabelecidos para tráfego padrão nas respectivas faixas de classificação PG, evidenciando a viabilidade técnica do uso desses ligantes modificados.
- (2) O envelhecimento a longo prazo provocou perdas de massa em todas as amostras, com exceção daquelas contendo teores de óleo superiores a 3%, sugerindo que a adição do óleo de babaçu pode mitigar os efeitos do envelhecimento térmico. Observou-se aumento na rigidez dos ligantes após o envelhecimento, evidenciado pela elevação da classificação PG e dos valores de módulo de cisalhamento dinâmico (G^*), confirmando a eficácia do método empregado. A presença de ácidos graxos no óleo, como o ácido láurico e oleico, favorece a formação de grupos funcionais capazes de interagir com os constituintes do ligante asfáltico, contribuindo para a atenuação do seu endurecimento e prolongamento da vida útil, sobretudo em condições de envelhecimento oxidativo.
- (3) Os ligantes recuperados dos RAPs modificados com 3%, 5% e 7% de óleo de babaçu apresentaram maior vida de fadiga em maiores amplitudes de deformação. O óleo de

babaçu atuou como agente rejuvenescedor, promovendo a redução da rigidez e a restauração das propriedades reológicas dos ligantes, conforme evidenciado pela atenuação das bandas características de sulfóxido (S=O) e carbonila (C=O) nos espectros de FTIR. Tal comportamento confirma a eficácia do óleo de babaçu em melhorar a coesão e a flexibilidade do ligante recuperado, favorecendo sua reutilização em misturas asfálticas com altos teores de RAP.

- (4) As misturas asfálticas contendo altos teores de RAP e óleo de babaçu, em especial a formulação com 70% de RAP e 7% de óleo, apresentaram desempenho mecânico equivalente ao da mistura de controle na maioria dos ensaios, além de destacarem-se pela maior resistência à fadiga por tração indireta em níveis elevados de tensão (45%, 50% e 55%). A viabilidade técnica das misturas recicladas com 56%, 63% e 70% de RAP evidencia o potencial de aplicação em larga escala, desde que acompanhada de investimentos tecnológicos em usinas de asfalto, incluindo a adoção de equipamentos específicos e aprimoramento nos processos de dosagem e compactação.
- (5) A utilização do óleo de babaçu como agente rejuvenescedor possibilitou o controle da rigidez das misturas asfálticas recicladas, permitindo a redução da espessura necessária da camada de revestimento e configurando-se como uma solução técnica viável, economicamente eficiente e com boa durabilidade. As simulações de dimensionamento mecanicista, conduzidas por meio do método MeDiNa, indicaram que misturas contendo maiores teores de RAP e rejuvenescedor apresentaram desempenho mecânico superior, possibilitando a diminuição da espessura estrutural. A menor espessura estimada foi de 10 cm para a mistura com 70% de RAP e 7% de óleo de babaçu, seguida por 12 cm para a mistura com 63% de RAP (5% BO) e 13 cm para a mistura com 56% de RAP (3% BO), demonstrando a capacidade dessas formulações de suportar cargas de tráfego com menores espessuras de pavimento.
- (6) A incorporação de RAP resultou em uma redução nos custos de produção por quilômetro de rodovia, variando de 18,26% a 72,98% para uma distância de transporte de 50 km, e de 17,27% a 71,48% para 100 km. Esses resultados evidenciam a viabilidade econômica da reciclagem de asfalto, com destaque para a mistura 70%RAP(7%BO), que apresentou os menores custos de produção. Misturas contendo mais de 50% de RAP demonstraram as maiores reduções nos custos. Embora a distância de transporte tenha influenciado os custos totais, a ordenação entre as misturas manteve-se consistente. Adicionalmente, o

uso de métodos avançados de dimensionamento, como o MeDiNa, permite uma avaliação mais precisa do custo-benefício das misturas recicladas, evitando superestimações da economia circular quando a análise se limita ao custo unitário por tonelada.

- (7) A circularidade das misturas asfálticas recicladas não está restrita à incorporação de materiais residuais, mas também à sua eficiência estrutural, viabilidade econômica e impacto ambiental. A adição de fluxo de material reciclado e o desempenho mecânico, sem a consideração de parâmetros ambientais e dos custos associados, podem levar a superestimações nas avaliações de sustentabilidade. A implementação de um índice integrado de circularidade (IICS_{MAR}), que combina o desempenho mecânico e o fluxo de materiais recicláveis (ICM) com os custos de produção e as emissões de CO₂, oferece uma base sólida para uma tomada de decisão mais robusta na gestão da infraestrutura viária. A ponderação de 0,50 para o ICM, e de 0,25 para os aspectos econômico e ambiental, foi considerada a mais representativa pelo painel de especialistas. As misturas recicladas apresentaram maior grau de circularidade, sendo classificadas na seguinte ordem decrescente: 70%RAP(7%BO) > 63%RAP(5%BO) > 56%RAP(3%BO) > 15%RAP(0%BO) > 0%RAP(0%BO).

A utilização do óleo de babaçu como agente rejuvenescedor em misturas asfálticas recicladas evidenciou ganhos no desempenho mecânico, bem como na viabilidade econômica e ambiental dessas soluções. A adição do óleo resultou em ligantes de menor rigidez, compatíveis com aplicações em misturas mornas, e favoreceu a recuperação das propriedades reológicas dos ligantes envelhecidos, contribuindo para a maior durabilidade das misturas. Misturas contendo altos teores de RAP e óleo de babaçu apresentaram desempenho mecânico comparável ao de composições convencionais, com destaque para a resistência à fadiga e a redução da espessura estrutural requerida. Sob a perspectiva econômica, a combinação de RAP e óleo de babaçu permitiu a diminuição dos custos de produção, confirmando a viabilidade da técnica de reciclagem. A aplicação do Índice Integrado de Circularidade (IICS_{MAR}), que incorpora parâmetros de desempenho mecânico, teor de material reciclado, custos e emissões de CO₂, proporcionou uma avaliação abrangente da sustentabilidade das misturas. Os resultados obtidos consolidam o óleo de babaçu como uma alternativa viável e sustentável para a pavimentação, com benefícios técnicos, econômicos e ambientais relevantes.

7.1. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A fim de orientar e expandir os estudos sobre a utilização do óleo de babaçu em pavimentação asfáltica, propõem-se as seguintes sugestões:

- (1) Investigar o impacto de diferentes óleos vegetais em misturas asfálticas recicladas com altos teores de RAP para avaliar alternativas ao óleo de babaçu.
- (2) Avaliar a viabilidade de teores elevados de RAP (acima de 50%) em conformidade com as normas brasileiras, considerando equipamentos e controle de dosagem.
- (3) Ampliar a análise de sensibilidade quanto à distância de transporte, visando identificar o limite máximo viável que preserve os benefícios econômicos e ambientais associados ao uso de RAP e óleo de babaçu na produção de misturas asfálticas recicladas.
- (4) Desenvolver modelos preditivos para avaliação da circularidade em sistemas de pavimentação asfáltica, incorporando parâmetros relacionados à durabilidade e manutenção, com base na aplicação de fatores de utilidade que integrem dados de desempenho em campo, como medições de deflexão obtidas por meio da *Viga Benkelman* ou do *Falling Weight Deflectometer* (FWD).
- (5) Avaliar o desempenho de trechos experimentais compostos por misturas asfálticas com altos teores de RAP e adição de óleo de babaçu, aplicadas em rodovias com volumes de tráfego de médio a alto.
- (6) Investigar o efeito do envelhecimento prolongado no desempenho mecânico de misturas recicladas e os efeitos na circularidade, visando a otimização da vida útil do pavimento e a redução de manutenção.
- (7) Avaliar os impactos sociais do uso de RAP e óleo de babaçu na geração de empregos, segurança viária e aceitação pública, considerando esses aspectos como parâmetros sociais para subsidiar políticas de infraestrutura mais equitativas e sustentáveis.
- (8) Analisar os efeitos da redução do consumo energético, resultante da diminuição da temperatura de produção das misturas asfálticas recicladas, sobre as emissões de CO₂, bem como sua aplicação na dimensão ambiental (pegada de carbono) considerada na determinação do Índice Integrado de Circularidade e Sustentabilidade para Misturas Asfálticas Recicladas (IICS_{MAR}).

REFERÊNCIAS

AASHTO M 320. **Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder**. [S. l.], 2021. Disponível em: https://www.techstreet.com/standards/aashto-m-320-21?product_id=2229878. Acesso em: 23 set. 2022.

AASHTO M332. **Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test**. [S. l.: s. n.], 2023.

AASHTO R30. **Standard Practice for Laboratory Conditioning of Asphalt Mixtures**. [S. l.], 2022. Disponível em: https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=AASHTO%20R%2030&item_s_key=00488905. Acesso em: 20 ago. 2022.

AASHTO T 391. **Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep**. [S. l.], 2020. Disponível em: https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?&document_name=AASHTO%20T%20391&item_s_key=00822231&item_key_date=791231. Acesso em: 31 ago. 2023.

ABD, Duraid M.; AL-KHALID, Hussain; AKHTAR, Riaz. Novel Methodology to Investigate and Obtain a Complete Blend between RAP and Virgin Materials. **JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING**, [s. l.], v. 30, n. 5, 2018. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002230](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002230). Acesso em: 30 set. 2023.

ABDALHAMEED, Abdalsattar M.; ABD, Duraid M. Rutting Performance of Asphalt Layers Mixtures with Inclusion RAP Materials. **Anbar Journal for Engineering Sciences**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 203–210, 2021. Disponível em: https://ajes.uoanbar.edu.iq/article_171188.html. Acesso em: 30 set. 2023.

ABDELAZIZ, Amal *et al.* Effects of ageing and recycling agents on the multiscale properties of binders with high RAP contents. **International Journal of Pavement Engineering**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 1248–1270, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1797736>. Acesso em: 30 set. 2023.

AFONSO, Sandra Regina; ÂNGELO, Humberto. Mercado dos produtos florestais não-madeireiros do cerrado brasileiro. **Ciência Florestal**, [s. l.], v. 19, p. 315–326, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/rtn7cjmzZZsznWmcN7KMPBv/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 2 mar. 2025.

AKHIMIEN, Noah Gethsemane; LATIF, Eshrar; HOU, Shan Shan. Application of circular economy principles in buildings: A systematic review. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 38, p. 102041, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710220336731>. Acesso em: 7 dez. 2023.

ALATTIEH, Sara A. *et al.* Performance assessment of bio-modified asphalt binder using extracted bio oil from date seeds waste. **International Journal of System Assurance**

Engineering and Management, [s. l.], v. 11, n. 6, p. 1260–1270, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13198-020-00980-1>. Acesso em: 1 out. 2023.

ALBIERO, Daniel *et al.* Proposta de uma máquina para colheita mecanizada de babaçu (*Orbignya phalerata* Mart.) para a agricultura familiar. **Acta Amazonica**, [s. l.], v. 37, p. 337–346, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/jrwGdZZ8Tvxpzf8h8GCCqKK/?lang=pt>. Acesso em: 16 set. 2023.

ALMUSAWI, Ali; SHOMAN, Sarmad; LUPANOV, Andrei P. Assessment of the effectiveness and the initial cost efficiency of hot recycled asphalt using polymer modified bitumen. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 18, p. e02145, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221450952300325X>. Acesso em: 16 set. 2023.

AL-SAFFAR, Zaid Hazim *et al.* A review on rejuvenating materials used with reclaimed hot mix asphalt. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 48, n. 3, p. 233–249, 2021. Disponível em: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/cjce-2019-0635>. Acesso em: 30 set. 2023.

AL-TAMEEMI, Ahmed F.; WANG, Yu; ALBAYATI, Amjad. Experimental Study of the Performance Related Properties of Asphalt Concrete Modified with Hydrated Lime. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 28, n. 5, p. 04015185, 2016. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001474>. Acesso em: 20 mar. 2025.

AN, Soonyong *et al.* Modeling of Asphalt Aging Based on Short-Term Aging Temperature and Time of Normal Asphalt Mixture for Quantifying Binder Aging. **International Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 15–25, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40999-021-00651-7>. Acesso em: 16 out. 2023.

ANASTASIADIS, K. *et al.* Translating the circular economy to bridge construction: Lessons learnt from a critical literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 117, p. 109522, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119307300>. Acesso em: 7 dez. 2023.

ANJOS, Sérgio Saraiva Nazareno dos; SANTOS, Ana Cristina dos. Tendências tecnológicas e de exportação de óleo bruto de babaçu. In: , 2019, Florianópolis. **7º Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia e Inovação de Biodiesel**. Florianópolis: [s. n.], 2019.

ANTHONISSEN, Joke; VAN DEN BERGH, Wim; BRAET, Johan. Review and environmental impact assessment of green technologies for base courses in bituminous pavements. **Environmental Impact Assessment Review**, [s. l.], v. 60, p. 139–147, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925515300378>. Acesso em: 17 set. 2023.

ANTUNES, Vítor; NEVES, José; FREIRE, Ana Cristina. Performance Assessment of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Road Surface Mixtures. **Recycling**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 32, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2313-4321/6/2/32>. Acesso em: 30 set. 2023.

ANWAR, M. N. *et al.* Sources of Carbon Dioxide and Environmental Issues. *In: INAMUDDIN; ASIRI, Abdullah M.; LICHTFOUSE, Eric (org.). Sustainable Agriculture Reviews 37: Carbon Sequestration Vol. 1 Introduction and Biochemical Methods*. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 13–36. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-29298-0_2. Acesso em: 3 mar. 2025.

AOCS CA 6A-40. **Unsaponifiable Matter in Fats and Oils, Except Marine Oils**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://myaccount.aocs.org/PersonifyEbusiness/Store/Product-Details?productId=111485>. Acesso em: 12 ago. 2023.

AOCS CC 1-25. **Melting Point, Capillary Tube Method**. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: <https://myaccount.aocs.org/PersonifyEbusiness/Store/Product-Details?productId=111494>. Acesso em: 1 jan. 2024.

AOCS CC 10C-95. **Determination of Mass per Unit Volume (“Liter Weight”) in Air of Oils and Fats**. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: <https://myaccount.aocs.org/PersonifyEbusiness/Store/Product-Details?productId=111492>. Acesso em: 1 jan. 2024.

AOCS CD 3-25. **Saponification Value of Fats and Oils**. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: <https://myaccount.aocs.org/PersonifyEbusiness/Store/Product-Details?productId=111542>. Acesso em: 1 jan. 2024.

AOCS CD 3D-63. **Acid Value of Fats and Oils**. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: <https://myaccount.aocs.org/PersonifyEbusiness/Store/Product-Details/productId/111545>. Acesso em: 1 jan. 2024.

AOCS CD 8-53. **Peroxide Value—Acetic Acid-Chloroform Method**. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: <https://myaccount.aocs.org/PersonifyEbusiness/Store/Product-Details?productId=217949329>. Acesso em: 1 jan. 2024.

AOCS TG 2A-64. **Iodine Value of Fatty Amines, Diamines, and Amidoamines, Modified Wijs**. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: <https://myaccount.aocs.org/PersonifyEbusiness/Store/Product-Details?productId=112607>. Acesso em: 1 jan. 2024.

ARAMBULA-MERCADO, Edith *et al.* **High Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Asphalt Mixes for Low Volume Roads**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: <https://rosap.nhl.bts.gov/view/dot/55738>. Acesso em: 20 ago. 2022.

ARKSEY, Hilary; O’MALLEY, Lisa. Scoping studies: towards a methodological framework. **International Journal of Social Research Methodology**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 19–32, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>. Acesso em: 11 dez. 2023.

ARMSTRONG, Rebecca *et al.* Cochrane Update. “Scoping the scope” of a cochrane review. **Journal of Public Health (Oxford, England)**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 147–150, 2011.

ARRUDA, Sonaly Mendes. Avaliação do comportamento mecânico e autorregenerativo de misturas asfálticas recicladas. [s. l.], 2021. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/21821>. Acesso em: 20 ago. 2022.

ASPHALT INSTITUTE. **Life Cycle Assessment of Asphalt Binder**. [S. l.: s. n.], 2019.

ASTM C 127. **Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate**. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://www.astm.org/c0127-15.html>. Acesso em: 8 abr. 2023.

ASTM C 1252. **Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading)**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.astm.org/c1252-17.html>. Acesso em: 8 abr. 2023.

ASTM C131. **Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine**. [S. l.], 2020. Disponível em: https://www.techstreet.com/standards/astm-c131-c131m-20?product_id=2110593. Acesso em: 20 ago. 2022.

ASTM D 4402. **Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.astm.org/d4402-06.html>. Acesso em: 8 abr. 2023.

ASTM D 4791. **Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.astm.org/d4791-19.html>. Acesso em: 8 abr. 2023.

ASTM D 5821. **Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.astm.org/d5821-13r17.html>. Acesso em: 8 abr. 2023.

ASTM D5/D5M. **Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials**. [S. l.], 2020. Disponível em: https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=ASTM%20D5%2FD5M&item_s_key=00602873. Acesso em: 20 ago. 2022.

ASTM D36. **Standard Test Method For Softening Point Of Bitumen (Ring-And-Ball Apparatus)**. [S. l.], 2020. Disponível em: https://www.techstreet.com/standards/astm-d36-d36m-14-2020?product_id=2114022. Acesso em: 20 ago. 2022.

ASTM D2172. **Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures**. [S. l.], 2017. Disponível em: https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?&document_name=ASTM%20D2172%2FD2172M&item_s_key=00567108&item_key_date=810731. Acesso em: 20 ago. 2022.

ASTM D2419. **Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregat**. [S. l.], 2014. Disponível em: <https://standards.globalspec.com/std/3855432/ASTM%20D2419-14>. Acesso em: 20 ago. 2022.

ASTM D2872. **Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test) Section 8 Instructional Video**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.astm.org/astm-tpt-541.html>. Acesso em: 20 ago. 2022.

ASTM D6373. **Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder**. [S. l.], 2021. Disponível em: https://infostore.saiglobal.com/en-us/Standards/ASTM-D-6373-2013-152730_SAIG_ASTM_ASTM_363335/. Acesso em: 20 ago. 2022.

ASTM D6521. **Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)**. [S. l.], 2022. Disponível em: Acesso em: 16 out. 2023.

ASTM D6925. **Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Asphalt Mix Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor**. [S. l.], 2015. Disponível em: https://webstore.ansi.org/Standards/ASTM/astmd692515?gclid=CjwKCAjwu5yYBhAjEiwAKXk_ePvGAXIHikEd0c3os_tTaDHYbE7mw1V4ztoWWgmtC0v2GFus-YkabhoCcYcQAvD_BwE. Acesso em: 25 ago. 2022.

ASTM D7405. **Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer**. [S. l.], 2020. Disponível em: https://www.techstreet.com/standards/astm-d7405-20?product_id=2106457. Acesso em: 20 ago. 2022.

ASTM E1252. **Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.astm.org/e1252-98r21.html>. Acesso em: 23 set. 2022.

AZAHAR, Wan Nur Aifa Wan *et al.* Chemical modification of waste cooking oil to improve the physical and rheological properties of asphalt binder. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 126, p. 218–226, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816314611>. Acesso em: 23 set. 2022.

BALCÃO AUTOMOTIVO. Estudo revela aumento na frota de veículos e no fluxo em estradas de SP e RJ. *In*: BALCÃO AUTOMOTIVO. 1 mar. 2024. Disponível em: <https://www.balcaoautomotivo.com/2024/03/01/estudo-revela-aumento-na-frota-de-veiculos-e-no-fluxo-em-estradas-de-sp-e-rj/>. Acesso em: 4 out. 2024.

BANAT, I. M. Biosurfactants production and possible uses in microbial enhanced oil recovery and oil pollution remediation: A review. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 51, n. 1, p. 1–12, 1995. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0960852494001016>. Acesso em: 30 set. 2023.

BEHIRY, Ahmed Ebrahim Abu El-Maaty. Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures. **Ain Shams Engineering Journal**, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 351–363, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447912000974>. Acesso em: 24 fev. 2025.

BESERRA COSTA, Daniel *et al.* Effects of recycling agents and methods on the fracture and moisture resistance of asphalt mixtures with high RAP contents. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 367, p. 130312, 2023a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823000235>. Acesso em: 8 abr. 2023.

BESERRA COSTA, Daniel *et al.* Effects of recycling agents and methods on the fracture and moisture resistance of asphalt mixtures with high RAP contents. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 367, p. 130312, 2023b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823000235>. Acesso em: 21 maio 2023.

BILEMA, Munder *et al.* Performance of Aged Asphalt Binder Treated with Various Types of Rejuvenators. **Civil Engineering Journal**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 502–517, 2021. Disponível em: <https://www.civilejournal.org/index.php/cej/article/view/2672>. Acesso em: 1 out. 2023.

BIODIESELBR. **Babaçu como opção**. [S. l.], 2007. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/biodiesel/analises/babacu-opcao-biodiesel-10set07>. Acesso em: 16 out. 2023.

BOFF, Leonardo. **Sustentabilidade: O que é - O que não é**. 5ª edição. [S. l.]: Editora Vozes, 2016.

BRANDÃO JÚNIOR, João *et al.* Performance of Eversa Transform 2.0 Lipase in Ester Production Using Babassu Oil (*Orbignya sp.*) and Tucuman Oil (*Astrocaryum vulgare*): A Comparative Study between Liquid and Immobilized Forms in Fe₃O₄ Nanoparticles. **Catalysts**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 571, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4344/13/3/571>. Acesso em: 13 abr. 2025.

CAPITÃO, Silvino Dias; DE PICADO-SANTOS, Luís Guilherme; MARQUES ALMEIDA, Arminda Maria. Properties of reclaimed asphalt pavement with Bio-Heating Oil as a rejuvenator considering ageing. **Transportation Engineering**, [s. l.], v. 19, p. 100295, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666691X24000691>. Acesso em: 13 abr. 2025.

CARVALHO, Flávia do Socorro de Sousa *et al.* Analysis of the mechanical parameters of asphalt mixtures with the addition of metallic oxides. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 26, 2021. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/rmat/a/bfr4ym9ysCMbbHYn9bjt8sn/?lang=pt>. Acesso em: 23 ago. 2022.

CARVALHO, Jeovanesa Régis. Avaliação de diferentes tecnologias de misturas asfálticas mornas com a incorporação de elevadas quantidades de material fresado. [s. l.], 2022. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/28732>. Acesso em: 16 set. 2023.

CARVALHO, Flávia do Socorro de Sousa *et al.* Characterization of Asphalt Mixtures with Addition of Drill-Well Gravel. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 35, n. 7, p. 04023180, 2023. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JMCEE7.MTENG-14944>. Acesso em: 5 ago. 2023.

CARVALHO, Jeovanesa Regis *et al.* Impact of adding warm asphalt mix additives on recycling milled coatings: performance evaluation. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 31, n. 58, p. 66318–66349, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35570-2>. Acesso em: 24 fev. 2025.

CAVALLI, M. C. *et al.* Aging effect on rheology and cracking behaviour of reclaimed binder with bio-based rejuvenators. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 189, p. 88–97, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618309922>. Acesso em: 1 out. 2023.

CENTOFANTE, Roberta *et al.* Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 23, p. e12178, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/GRxdqV4YXCJXVrfwMWMhqvz/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 2 dez. 2023.

CERDEIRA, Joselle Ferraz. **Estudo de misturas asfálticas recicladas a quente contendo 100% de material fresado para execução de tapa-buracos**. 2018. - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

CHANTARANGSI, Wanpen *et al.* Normal probability plots with confidence. **Biometrical Journal. Biometrische Zeitschrift**, [s. l.], v. 57, n. 1, p. 52–63, 2015.

CHAPPAT, M; BILAL, J. **Sustainable Development: The Environmental Road of the Future, Life Cycle Analysis**. [S. l.]: COLAS, 2003.

CHEN, Tian *et al.* Mechanical and microstructural characteristics of different interfaces in cold recycled mixture containing cement and asphalt emulsion. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 258, p. 120674, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620307216>. Acesso em: 17 set. 2023.

CHEN, Yuheng *et al.* 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**, [s. l.], v. 15, p. e00722, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521002370>. Acesso em: 19 jun. 2023.

CHEN, Hui; BAHIA, Hussain U. Modelling effects of aging on asphalt binder fatigue using complex modulus and the LAS test. **International Journal of Fatigue**, [s. l.], v. 146, p. 106150, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112321000104>. Acesso em: 2 set. 2023.

CHEN, Qian; FENG, Haibo; GARCIA DE SOTO, Borja. Revamping construction supply chain processes with circular economy strategies: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 335, p. 130240, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262104405X>. Acesso em: 7 dez. 2023.

CHICCO, Davide; WARRENS, Matthijs J.; JURMAN, Giuseppe. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. **PeerJ Computer Science**, [s. l.], v. 7, p. e623, 2021. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8279135/>. Acesso em: 23 set. 2024.

CHIU, Chui-Te; HSU, Tseng-Hsing; YANG, Wan-Fa. Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 52, n. 3, p. 545–556, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344907001589>. Acesso em: 17 set. 2023.

ÇIMEN, Ömer. Construction and built environment in circular economy: A comprehensive literature review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 305, p. 127180, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621013998>. Acesso em: 7 dez. 2023.

CLEMENT, C. R.; LLERAS, E.; LEEUWEN, J. van. O potencial das palmeiras tropicais no Brasil: acertos e fracassos das últimas décadas. [s. l.], 2005. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/678989>. Acesso em: 16 out. 2023.

COFFEY, Sean *et al.* Determining the impact of degree of blending and quality of reclaimed asphalt pavement on predicted pavement performance using pavement ME design. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 48, p. 473–478, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813005308>. Acesso em: 30 set. 2023.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Boletim da Sociobiodiversidade**. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuário-e-extrativista/boletim-da-sociobiodiversidade/boletim-sociobio/item/download/14010_3588810135f47d3244565efa3531b6ab.

COOPER, Samuel B.; MOHAMMAD, Louay N.; ELSEIFI, Mostafa A. Laboratory Performance of Asphalt Mixtures Containing Recycled Asphalt Shingles, Reclaimed Asphalt Pavement, and Recycling Agents. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 29, n. 3, p. D4016001, 2017. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001658>. Acesso em: 19 jun. 2023.

CORONA, B. *et al.* Metrics for minimising environmental impacts while maximising circularity in biobased products: The case of lignin-based asphalt. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 379, p. 134829, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262204402X>. Acesso em: 1 fev. 2025.

COSTA, Daniel Beserra. Análise do envelhecimento, rigidez e suscetibilidade á presença de água em misturas recicladas com adição de agentes de reciclagem. [s. l.], 2022. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/27481>. Acesso em: 4 jul. 2023.

COSTA, Laiana Ferreira Da. **MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE CONTENDO ADITIVOS: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO, ECONÔMICO E AMBIENTAL**. 2023. - Universidade Federal de Campina Grande, [s. l.], 2023.

COUTINHO, Renato Peixoto. Utilização da parte fina de misturas asfálticas para avaliação do dano por fadiga. [s. l.], 2012. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/4888>. Acesso em: 16 out. 2023.

CRAVO, Margareth Carvalho Coutinho. Efeitos do envelhecimento térmico e fotoquímico em ligantes asfálticos, mástique e matriz de agregados finos. [s. l.], 2016. Disponível em: <http://pantheon.ufrj.br/handle/11422/10184>. Acesso em: 29 ago. 2023.

CRUZ, Gabryelle Keith Avelino *et al.* Influence of particle size selection methods on asphalt mixtures produced with lateritic aggregates. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 314, p. 125201, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821029457>. Acesso em: 24 ago. 2022.

DA COSTA, Laiana Ferreira *et al.* Economic and environmental benefits of recycled asphalt mixtures: impact of reclaimed asphalt pavement and additives throughout the life cycle. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36362-y>. Acesso em: 13 abr. 2025.

DA COSTA, Laiana Ferreira *et al.* Optimizing recycled asphalt mixtures with zeolite, cottonseed oil, and varied RAP content for enhanced performance and circular economy impact. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 20, p. e02707, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509523008884>. Acesso em: 2 dez. 2023.

DANDAMUDI, Kodanda Phani Raj *et al.* Hydrothermal liquefaction of green microalga *Kirchneriella* sp. under sub- and super-critical water conditions. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 120, p. 224–228, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953418303179>. Acesso em: 30 set. 2023.

DARMAWAN, Arif; AZIZ, Muhammad. **Innovative Energy Conversion from Biomass Waste**. [S. l.]: Elsevier, 2021.

DARYAEE, Daryoosh; AMERI, Mahmoud; MANSOURKHAKI, Ali. Utilizing of waste polymer modified bitumen in combination with rejuvenator in high reclaimed asphalt pavement mixtures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 235, p. 117516, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181932968X>. Acesso em: 3 out. 2024.

DE LIMA, Roberto Xavier *et al.* Distribution of Materials in Road Earthmoving and Paving: Mathematical Programming Approach. **Journal of Construction Engineering and Management**, [s. l.], v. 139, n. 8, p. 1046–1054, 2013. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CO.1943-7862.0000666>. Acesso em: 7 dez. 2023.

DE MEDEIROS MELO NETO, Osires *et al.* Effects of the addition of fatty acid from soybean oil sludge in recycled asphalt mixtures. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], 2023a. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25808-w>. Acesso em: 8 abr. 2023.

DE MEDEIROS MELO NETO, Osires *et al.* Effects of the addition of fatty acid from soybean oil sludge in recycled asphalt mixtures. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 30, n. 17, p. 50174–50197, 2023b. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25808-w>. Acesso em: 21 maio 2023.

DE MEDEIROS MELO NETO, Osires *et al.* Impact of sustainable additives on the thickness of the wearing course in flexible pavements: a comparison between design methodologies in Brazil. **Innovative Infrastructure Solutions**, [s. l.], v. 9, n. 9, p. 336, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01645-9>. Acesso em: 23 ago. 2024.

DE MEDEIROS MELO NETO, Osires *et al.* Physical and Rheological Study of Asphalt Binders with Soybean Oil Sludge and Soybean Oil Sludge Fatty Acid. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 14, n. 6, p. 1945–1967, 2023c. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01951-2>. Acesso em: 21 maio 2023.

DE MEDEIROS MELO NETO, Osires *et al.* Viability of recycled asphalt mixtures with soybean oil sludge fatty acid. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 349, p. 128728, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822023856>. Acesso em: 20 ago. 2022.

DE MORAES, Thalita Maria Ramos Porto *et al.* Viability of Asphalt Mixtures with Iron Ore Tailings as a Partial Substitute for Fine Aggregate. **Transportation Research Record**, [s. l.], p. 03611981231176289, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/03611981231176289>. Acesso em: 26 jun. 2023.

DE PAULA PROTÁSIO, Thiago *et al.* Babassu nut residues: potential for bioenergy use in the North and Northeast of Brazil. **SpringerPlus**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 124, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-124>. Acesso em: 16 set. 2023.

DELBEKE, Jos *et al.* The Paris Agreement. In: TOWARDS A CLIMATE-NEUTRAL EUROPE. [S. l.]: Routledge, 2019.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Projeto de Pavimentação - Instrução de Projeto**. [S. l.: s. n.], 2006.

DEVULAPALLI, Lekhaz; KOTHANDARAMAN, Saravanan; SARANG, Goutham. A review on the mechanisms involved in reclaimed asphalt pavement. **International Journal of Pavement Research and Technology**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 185–196, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42947-019-0024-1>. Acesso em: 20 ago. 2022.

DIAS, Thiago Lucena. **Influência do tempo de mistura e da temperatura de usinagem em misturas asfálticas recicladas: desempenho mecânico, circularidade e estimativa de custos**. 2024. - Universidade Federal de Campina Grande, [s. l.], 2024.

DING, Xunhao *et al.* Laboratory investigation of the recycled asphalt concrete with stable crumb rubber asphalt binder. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 203, p. 552–557, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181930131X>. Acesso em: 17 set. 2023.

DNIT. **Custo Médio Gerencial**. [S. l.: s. n.], 2024.

DNIT. **Índices de Reajustamentos de Obras Rodoviárias**. [S. l.: s. n.], 2025.

DNIT. **Manual de Custos Médios Gerenciais. Manual de Metodologia**. [S. l.: s. n.], 2019.

DNIT 031. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. [s. l.], 2006.

DNIT 033. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado em usina a quente – Especificação de serviço**. [S. l.: s. n.], 2021.

DNIT 135. **Asphalt pavement - Asphalt mixtures - Determination of the resilient modulus - Test method**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/462947290/Norma-DNIT-135-2018-ME>. Acesso em: 20 ago. 2022.

DNIT 136. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. [s. l.], 2018.

DNIT 137. **Pavimentação – Regularização do Subleito**. [S. l.: s. n.], 2010.

DNIT 139. **Pavimentação – Sub-Base Estabilizada Granulometricamente**. [S. l.: s. n.], 2010.

DNIT 141. **Pavimentação – Base Estabilizada Granulometricamente – Especificação de Serviço**. [S. l.: s. n.], 2022.

DNIT 180, Norma. Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio. [s. l.], p. 9, 2018.

DNIT 183. Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. [s. l.], p. 15, 2018.

DNIT 383. **Wear due to abrasion of bituminous mixtures with asphalt polymer - Cantabro assay**. [S. l.: s. n.], 1999.

DURRIEU, Françoise; FARCAS, Fabienne; MOUILLET, Virginie. The influence of UV aging of a Styrene/Butadiene/Styrene modified bitumen: Comparison between laboratory and on site aging. **Fuel**, [s. l.], v. 86, n. 10, p. 1446–1451, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236106004704>. Acesso em: 16 out. 2023.

EAPA. **Asphalt in Figures 2019 - European Asphalt Pavement Association, Brussels**. [S. l.: s. n.], 2020.

EASTERLY, James L.; BURNHAM, Margo. Overview of biomass and waste fuel resources for power production. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 10, n. 2, Strategic Benefits of Biomass and Wasteful fuels, p. 79–92, 1996. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0961953495000631>. Acesso em: 30 set. 2023.

EL BEZE, Laëtitia. **Recyclage à chaud des agrégats d'enrobés bitumeux : identification de traceurs d'homogénéité du mélange entre bitume vieilli et bitume neuf d'apport.** 2008. These de doctorat - Aix-Marseille 3, [s. l.], 2008. Disponível em: <https://www.theses.fr/2008AIX30044>. Acesso em: 16 out. 2023.

ELKASHEF, Mohamed; WILLIAMS, R. Christopher; COCHRAN, Eric. Investigation of fatigue and thermal cracking behavior of rejuvenated reclaimed asphalt pavement binders and mixtures. **International Journal of Fatigue**, [s. l.], v. 108, p. 90–95, 2018a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112317304395>. Acesso em: 25 jun. 2024.

ELKASHEF, Mohamed; WILLIAMS, R. Christopher; COCHRAN, Eric W. Physical and chemical characterization of rejuvenated reclaimed asphalt pavement (RAP) binders using rheology testing and pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 51, n. 1, p. 12, 2018b. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1141-z>. Acesso em: 25 jun. 2024.

EL-SHORBAGY, Amira M.; EL-BADAWY, Sherif M.; GABR, Alaa R. Investigation of waste oils as rejuvenators of aged bitumen for sustainable pavement. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 220, p. 228–237, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819313595>. Acesso em: 4 out. 2024.

EMBRAPA. **Babaçu: Programa Nacional de Pesquisa. - Portal Embrapa.** [S. l.], 1984. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/51263/babacu-programa-nacional-de-pesquisa>. Acesso em: 16 out. 2023.

EMBRAPA. **Bioeconomia: a ciência do futuro no presente.** [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-bioeconomia/sobre-o-tema#:~:text=Bioeconomia%20%C3%A9%20um%20modelo%20de,novo%2C%20mas%20a%20ci%C3%Aancia%20n%C3%A3o>.

EPPS, Amy *et al.* **Evaluating the Effects of Recycling Agents on Asphalt Mixtures with High RAS and RAP Binder Ratios.** [S. l.]: Transportation Research Board; National, 2020.

FANG, Ying *et al.* Comprehensive review on the application of bio-rejuvenator in the regeneration of waste asphalt materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 295, p. 123631, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006182101391X>. Acesso em: 30 set. 2023.

FEDERAL ENVIRONMENT MINISTRY. **Fundamentals of the National Circular Economy Strategy (NKWS)- BMUV - Download.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.bmuv.de/DL3073-1>. Acesso em: 2 mar. 2025.

FERREIRA, Bianca Silva; FAZA, Lara Pereira; LE HYARIC, Mireille. A comparison of the physicochemical properties and fatty acid composition of indaiá (*Attalea dubia*) and Babassu (*Orbignya phalerata*) oils. **TheScientificWorldJournal**, [s. l.], v. 2012, p. 532374, 2012.

FINI, Elham H.; HUNG, Albert M.; ROY, Anirban. Active Mineral Fillers Arrest Migrations of Alkane Acids to the Interface of Bitumen and Siliceous Surfaces. **ACS Sustainable**

Chemistry & Engineering, [s. l.], v. 7, n. 12, p. 10340–10348, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00352>. Acesso em: 20 mar. 2025.

FINI, Elham H.; YANG, Shih-Hsien; XIU, Shuangning. Characterization and Application of Manure-Based Bio-binder in Asphalt Industry. *In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 89TH ANNUAL MEETING* TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 10–2871., 2010. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2010. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/910772>. Acesso em: 30 set. 2023.

FLÁVIA JUSTINO UCHOA, Antonia *et al.* Bio-based palm oil as an additive for asphalt binder: Chemical characterization and rheological properties. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 285, p. 122883, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821006437>. Acesso em: 2 mar. 2024.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos - SISPAV**. 2007. - Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Manual para utilização do Método Mecânico-Empírico MeDiNa**. [S. l.]: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020a.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Manual para utilização do Método Mecânico-Empírico MeDiNa - Apresentação dos programas**. [S. l.]: COPPE (UFRJ), 2020b.

FRAZÃO, J. M. F. **Alternativas econômicas para agricultura familiar assentadas em áreas de ecossistemas de babaquais**. São Luís: Relatório técnico Governo do Estado do Maranhão, 2001.

FREIRE, Reuber Arrais. Evaluation of the coarse aggregate influence in the fatigue damage using fine aggregate matrices with different maximum nominal sizes. [s. l.], 2015. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/13875>. Acesso em: 16 out. 2023.

FRITZEN, M.A; FRANCO, F.A.C.P; NASCIMENTO, L.A. Classification of Asphalt Mixtures Regarding Fatigue Performance. *In: 9TH PORTUGUESE ROAD CONGRESS*, 2019, Lisboa. **Anais [...]**. Lisboa: [s. n.], 2019.

GALÁN-CANO, Lucía *et al.* Urban metabolism, sustainability and energy transition in cities: A comprehensive review. **Results in Engineering**, [s. l.], v. 25, p. 104278, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025003639>. Acesso em: 2 mar. 2025.

GAO, Hui *et al.* Degradation of asphaltenes by two *Pseudomonas aeruginosa* strains and their effects on physicochemical properties of crude oil. **International Biodeterioration & Biodegradation**, [s. l.], v. 122, p. 12–22, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964830516307958>. Acesso em: 30 set. 2023.

GEISSDOERFER, Martin *et al.* The Circular Economy – A new sustainability paradigm?. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 143, p. 757–768, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616321023>. Acesso em: 7 dez. 2023.

GHOLAMI, Masood; KHODAI, Ali; HAJIKARIMI, Pouria. A multifaceted purpose-oriented approach to evaluate material circularity index for rejuvenated recycled asphalt mixtures. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 12213, 2025. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-96749-2>. Acesso em: 13 abr. 2025.

GHOSAL, Debajyoti *et al.* Current State of Knowledge in Microbial Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A Review. **Frontiers in Microbiology**, [s. l.], v. 7, 2016. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2016.01369>. Acesso em: 30 set. 2023.

GOLI, Hadi; LATIFI, Manouchehr. Evaluation of the effect of moisture on behavior of warm mix asphalt (WMA) mixtures containing recycled asphalt pavement (RAP). **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 247, p. 118526, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820305316>. Acesso em: 23 set. 2022.

GONÇALVES, Bruno César Silva *et al.* Avaliação da centrífuga rotarex na determinação do teor de ligante e granulometria de diferentes concretos asfálticos. **TRANSPORTES**, [s. l.], v. 28, n. 3, p. 75–90, 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1841>. Acesso em: 14 jun. 2023.

GONG, Minghui *et al.* Physical–chemical properties of aged asphalt rejuvenated by bio-oil derived from biodiesel residue. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 105, p. 35–45, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815306942>. Acesso em: 1 out. 2023.

GOUVEIA, Vera Maria. O mercado de amêndoas de babaçu no estado do Maranhão. [s. l.], 2015. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/18812>. Acesso em: 2 mar. 2025.

GRAJALES, Javier A. *et al.* Quantum Chemical Modeling of the Effects of Hydrated Lime (Calcium Hydroxide) as a Filler in Bituminous Materials. **ACS Omega**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 3130–3139, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05519>. Acesso em: 20 mar. 2025.

GUABIROBA, João Victor de Oliveira Coelho *et al.* Estudo da Fadiga e da Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Produzidas em Goiás. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 28, p. e13232, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/RDFynNhwtBB8RkQPS8R9NMh/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 17 set. 2023.

GUERRA, Thamires Dantas *et al.* Efeitos da adição do óleo de canola nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas. **TRANSPORTES**, [s. l.], v. 31, n. 3, p. e2857–e2857, 2023. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2857>. Acesso em: 23 jan. 2024.

GULZAR, Saqib *et al.* Towards sustainable roads: A State-of-the-art review on the use of recycling agents in recycled asphalt mixtures. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 406, p. 136994, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652623011526>. Acesso em: 30 set. 2023.

GUO, Yang *et al.* A review of bio-oil production from hydrothermal liquefaction of algae. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 48, p. 776–790, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115003196>. Acesso em: 30 set. 2023.

HARMAN-WARE, Anne E. *et al.* Microalgae as a renewable fuel source: Fast pyrolysis of *Scenedesmus* sp. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 60, p. 625–632, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113003091>. Acesso em: 30 set. 2023.

HARVEY, John *et al.* **Pavement Life Cycle Assessment Framework**. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/38470>. Acesso em: 7 dez. 2023.

HASHEMINEZHAD, Araz; CEYLAN, Halil; KIM, Sunghwan. Sustainability promotion through asphalt pavements: A review of existing tools and innovations. **Sustainable Materials and Technologies**, [s. l.], v. 42, p. e01162, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993724003427>. Acesso em: 2 mar. 2025.

HE, Zuxing *et al.* Phytochemicals, nutritionals and antioxidant properties of miracle fruit *Synsepalum dulcificum*. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 86, p. 87–94, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669016301789>. Acesso em: 1 out. 2023.

HERRMANN, Isadora *et al.* Coordenação no SAG do babaçu: exploração racional possível?. **Anais**, [s. l.], 2001. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001206609>. Acesso em: 16 out. 2023.

HESAMI, Saeid *et al.* Evaluate the mechanism of the effect of hydrated lime on moisture damage of warm mix asphalt. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 47, p. 935–941, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813004777>. Acesso em: 30 set. 2024.

HICKEL, Jason *et al.* National responsibility for ecological breakdown: a fair-shares assessment of resource use, 1970–2017. **The Lancet Planetary Health**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. e342–e349, 2022. Disponível em: [https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196\(22\)00044-4/fulltext?start=1047%3Fstart%3D1047%3Fstart%3D1047%3Fstart%3D1047?start=1047%3Fstart%3D1047%3Fstart%3D1047%3Fstart%3D1047](https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196(22)00044-4/fulltext?start=1047%3Fstart%3D1047%3Fstart%3D1047%3Fstart%3D1047?start=1047%3Fstart%3D1047%3Fstart%3D1047%3Fstart%3D1047). Acesso em: 2 mar. 2025.

HINTZ, Cassie; BAHIA, Hussain. Simplification of Linear Amplitude Sweep Test and Specification Parameter. **Transportation Research Record**, [s. l.], v. 2370, n. 1, p. 10–16, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2370-02>. Acesso em: 16 nov. 2022.

HOFKO, B. *et al.* Impact of maltene and asphaltene fraction on mechanical behavior and microstructure of bitumen. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 49, n. 3, p. 829–841, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0541-6>. Acesso em: 16 out. 2023.

HOSSAIN, Md. Uzzal *et al.* Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 130, p. 109948, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120302392>. Acesso em: 7 dez. 2023.

HU, Yongping *et al.* Characterisation of bitumen through multiple ageing-rejuvenation cycles. **International Journal of Pavement Engineering**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 2365350, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2024.2365350>. Acesso em: 17 jun. 2024.

HUANG, Baoshan; SHU, Xiang; VUKOSAVLJEVIC, Dragon. Laboratory Investigation of Cracking Resistance of Hot-Mix Asphalt Field Mixtures Containing Screened Reclaimed Asphalt Pavement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 23, n. 11, p. 1535–1543, 2011. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000223>. Acesso em: 17 set. 2023.

HUNG, Albert M. *et al.* Intermolecular Interactions of Isolated Bio-Oil Compounds and Their Effect on Bitumen Interfaces. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, [s. l.], v. 5, n. 9, p. 7920–7931, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01462>. Acesso em: 30 set. 2023.

IPR. **Instituto de Pesquisas Rodoviárias: Diretrizes básicas para execução de misturas asfálticas mornas com o uso de aditivos surfactantes (Publicação IPR 747)**. [S. l.: s. n.], 2018.

ISO 4833-1. **Microbiology of the food chain Horizontal method for the enumeration of microorganisms**. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/53728.html>. Acesso em: 1 jan. 2024.

JI, Haidong *et al.* Waste cooking oil as a sustainable solution for UV-aged asphalt binder: Rheological, chemical and molecular structure. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 420, p. 135149, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061824002903>. Acesso em: 21 maio 2024.

JIANG, Wei *et al.* Experimental study of the performance of porous ultra-thin asphalt overlay. **International Journal of Pavement Engineering**, [s. l.], v. 23, n. 6, p. 2049–2061, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1837826>. Acesso em: 16 set. 2023.

JIANG, Wei; HUANG, Yue; SHA, Aimin. A review of eco-friendly functional road materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 191, p. 1082–1092, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818324887>. Acesso em: 2 mar. 2025.

JIAO, Liya *et al.* Evaluating fatigue performance of fine aggregate matrix mixes with reclaimed asphalt pavement and rejuvenating agents. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 445–460, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1826352>. Acesso em: 3 out. 2024.

JIN, Mingyu *et al.* Optimum Utilization of Biochemical Components in *Chlorella* sp. KR1 via Subcritical Hydrothermal Liquefaction. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, [s. l.], v. 5, n. 8, p. 7240–7248, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01473>. Acesso em: 30 set. 2023.

JOENSUU, Tuomo; EDELMAN, Harry; SAARI, Arto. Circular economy practices in the built environment. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 276, p. 124215, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620342608>. Acesso em: 7 dez. 2023.

JUNK, Wolfgang J. *et al.* Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: a synthesis. **Aquatic Sciences**, [s. l.], v. 75, n. 1, p. 151–167, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00027-012-0278-z>. Acesso em: 3 mar. 2025.

KASEER, Fawaz *et al.* Performance of asphalt mixtures with high recycled materials content and recycling agents. **International Journal of Pavement Engineering**, [s. l.], v. 21, n. 7, p. 863–877, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1511990>. Acesso em: 1 out. 2024.

KASEER, Fawaz; MARTIN, Amy Epps; ARÁMBULA-MERCADO, Edith. Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States: A literature review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 211, p. 974–987, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819307858>. Acesso em: 30 set. 2023.

KAZA, Silpa *et al.* **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. [S. l.]: World Bank Publications, 2018.

KIM, Y. Richard *et al.* **Long-Term Aging of Asphalt Mixtures for Performance Testing and Prediction**. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2017. Disponível em: <https://www.nap.edu/catalog/24959>. Acesso em: 3 jun. 2023.

KNIESS, Dena; AND PENROSE, Courtney. Using Focus Groups to Listen, Learn, and Lead in Higher Education: Danner, M. J. E., Pickering, J. W., & Paredes, T. M. (2018). Using focus groups to listen, learn, and lead in higher education. Sterling, VA: Stylus. 192 pp. ISBN: 978-1-62036-597-7 (\$32.50, paperback). **Journal of Student Affairs Research and Practice**, [s. l.], v. 58, n. 4, p. 474–476, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19496591.2020.1723606>. Acesso em: 19 abr. 2025.

KODRAT, Irsan; SOHN, Dave; HESP, Simon A. M. Comparison of Polyphosphoric Acid-Modified Asphalt Binders with Straight and Polymer-Modified Materials. **Transportation Research Record**, [s. l.], v. 1998, n. 1, p. 47–55, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/1998-06>. Acesso em: 7 jun. 2023.

KONO, A. **Da necessidade de programar o desenvolvimento da economia do babaçu**. [S. l.: s. n.], 1976.

LARSON, Martin G. Analysis of variance. **Circulation**, [s. l.], v. 117, n. 1, p. 115–121, 2008.

LEITE, Leni Figueiredo Mathias *et al.* **Informações básicas sobre materiais asfálticos - A importância das características dos agregados no desempenho das misturas asfálticas**. [S. l.]: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP), 2021.

LI, Danning *et al.* Blending efficiency of reclaimed asphalt rubber pavement mixture and its correlation with cracking resistance. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 185, p. 106506, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922003494>. Acesso em: 30 set. 2023.

LI, Xiaojun *et al.* Cost, energy, and greenhouse gas analysis of fly ash stabilised cold in-place recycled asphalt pavement. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 537–550, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.779302>. Acesso em: 7 dez. 2023.

LI, X-J *et al.* Effect of laboratory long-term oven aging on the stiffness of asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 258, p. 120252, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820322571>. Acesso em: 16 out. 2023.

LI, Mingchen *et al.* Gel permeation chromatography-based method for assessing the properties of binders in reclaimed asphalt pavement mixtures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 316, p. 126005, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061821037375>. Acesso em: 30 set. 2023.

LI, Yue *et al.* Ground tire rubber thermo-mechanically devulcanized in the presence of waste engine oil as asphalt modifier. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 222, p. 588–600, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819315909>. Acesso em: 16 set. 2023.

LO PRESTI, Davide *et al.* Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: binder design methodology and case studies. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 131, p. 43–51, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616305571>. Acesso em: 30 set. 2023.

LOPES, Albaniza Maria da Silva. **Avaliação dos efeitos da temperatura, radiação uv e umidade nas propriedades de ligantes e misturas asfálticas**. 2023. - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

LOPES, Osvaldo Candido. **Novos catalizadores para transesterificação de óleos vegetais**. [S. l.], 1983.

LOPES, Maurício Antônio. **O Brasil na Bioeconomia**. [S. l.: s. n.], 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/3382121/artigo---o-brasil-na-bioeconomia>.

LU, Qing *et al.* **A Life Cycle Assessment Framework for Pavement Maintenance and Rehabilitation Technologies: An Integrated Life Cycle Assessment (LCA) – Life Cycle Cost Analysis (LCCA) Framework for Pavement Maintenance and Rehabilitation**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/35438>. Acesso em: 7 dez. 2023.

LU, Xiaohu; ISACSSON, Ulf. Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 15–22, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061801000332>. Acesso em: 16 out. 2023.

LV, Songtao *et al.* Rheological and microscopic characteristics of bio-oil recycled asphalt. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 295, p. 126449, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621006697>. Acesso em: 1 out. 2023.

MA, Yuetan *et al.* Performance evaluation of temperature effect on hot in-place recycling asphalt mixtures. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 277, p. 124093, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965262034138X>. Acesso em: 30 set. 2023.

MA, Yuetan *et al.* Quantifying the effective mobilized RAP content during hot in-place recycling techniques. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 314, p. 127953, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652621021715>. Acesso em: 30 set. 2023.

MAJIDIFARD, Hamed; TABATABAEE, Nader; BUTTLAR, William. Investigating short-term and long-term binder performance of high-RAP mixtures containing waste cooking oil. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, [s. l.], v. 6, n. 4, Advances in asphalt emulsion application for cold paving technologies, p. 396–406, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756418302447>. Acesso em: 1 out. 2023.

MAKOWSKA, Michalina; AROMAA, Kalle; PELLINEN, Terhi. The rheological transformation of bitumen during the recycling of repetitively aged asphalt pavement. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 18, n. sup2, p. 50–65, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1304266>. Acesso em: 17 jun. 2024.

MANTALOVAS, Konstantinos; DI MINO, Gaetano. Integrating Circularity in the Sustainability Assessment of Asphalt Mixtures. **Sustainability**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 594, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/2/594>. Acesso em: 1 dez. 2022.

MANTALOVAS, Konstantinos; DI MINO, Gaetano. The Sustainability of Reclaimed Asphalt as a Resource for Road Pavement Management through a Circular Economic Model. **Sustainability**, [s. l.], v. 11, n. 8, p. 2234, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/8/2234>. Acesso em: 1 fev. 2025.

MASCARENHAS, Zila M. G. *et al.* Comparative environmental performance of pavement structures considering recycled materials and regional differences. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 858, p. 159862, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722069625>. Acesso em: 2 jan. 2024.

MAY, Peter H. Transformações Agrárias nos babaçuais do Maranhão. [s. l.], 1987.

MAZZONI, Laura Nascimento *et al.* Avaliação da influência do envelhecimento e da temperatura nas características viscoelásticas de ligantes asfálticos. **TRANSPORTES**, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 135–146, 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1897>. Acesso em: 29 ago. 2023.

MCDANIEL, Rebecca; ANDERSON, R. Michael. **Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method: technician's manual**. Washington, D.C: National Academy Press, 2001. (NCHRP report, v. no. 452).

MCHUGH, M. Multiple comparison analysis testing in ANOVA. **Biochemia medica**, [s. l.], v. 21 3, p. 203–9, 2011. Disponível em: <https://consensus.app/papers/multiple-comparison-analysis-testing-anova-mchugh/4384a11579715b919385ab0265058acb/>. Acesso em: 23 set. 2024.

MCKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 83, n. 1, Reviews Issue, p. 37–46, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852401001183>. Acesso em: 30 set. 2023.

MENDES, Lara Pereira Tavares *et al.* Economia circular como mecanismo de gestão ambiental: utilização de RAP em camadas de revestimento asfáltico. **Revista Brasileira de Gestao Ambiental e Sustentabilidade**, [s. l.], v. 10, n. 24, p. 151–169, 2023. Disponível em: <http://revista.ecogestaoBrasil.net/v10n24/v10n24a11a.html>. Acesso em: 1 fev. 2025.

MENDES, Lara Pereira Tavares. **Viabilidade mecânica, econômica e ambiental de mistura asfáltica reciclada com resíduo de bauxita**. 2024. - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2024.

MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte *et al.* Análise física-reológica de ligantes asfálticos modificados com óleo de algodão refinado para uso em misturas asfálticas mornas: e325. **Revista Cubana de Ingeniería**, [s. l.], v. 13, n. 2, 2022a. Disponível em: <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/830>. Acesso em: 31 ago. 2022.

MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte *et al.* Physical-rheological analysis of asphalt binders modified with refined cottonseed oil for use in warm asphalt mixtures. **Revista Cubana de Ingeniería**, [s. l.], v. 13, n. 2, 2022b. Disponível em: <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/830>. Acesso em: 24 ago. 2022.

MENEGAKI, Maria; DAMIGOS, Dimitris. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, [s. l.], v. 13, Reuse and Recycling / UN SGDs: How can Sustainable Chemistry Contribute? / Green Chemistry in Education, p. 8–15, 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S245222361830018X>. Acesso em: 7 dez. 2023.

MERONI, Fabrizio *et al.* Three-level performance evaluation of high RAP asphalt surface mixes. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 309, p. 125164, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821029081>. Acesso em: 2 mar. 2025.

MHATRE, Purva *et al.* Circular economy in built environment – Literature review and theory development. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 35, p. 101995, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710220336275>. Acesso em: 7 dez. 2023.

MINERVINA SILVA, Ingridy *et al.* Assessing the efficacy of alginate-encapsulated rejuvenators from soybean oil sludge and fatty acid for enhanced self-healing capacity of asphalt mixtures. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 0, n. 0, p. 1–25, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2024.2338778>. Acesso em: 18 abr. 2024.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA. **Guia Geral de Análise Socioeconômica de Custo-Benefício de Projetos de Investimento em Infraestrutura**. [S. l.: s. n.], 2022.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS. **Governo Federal Lança a Estratégia Nacional de Bioeconomia**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/junho/governo-federal-lanca-a-estrategia-nacional-de-bioeconomia>.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. **MMA lança planejamento estratégico 2024-2027 e assina acordos de gestão**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/mma-lanca-planejamento-estrategico-2024-2027-e-assina-acordos-de-gestao>.

MOINS, B. *et al.* Implementing life cycle cost analysis in road engineering: A critical review on methodological framework choices. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 133, p. 110284, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120305724>. Acesso em: 7 dez. 2023.

MONIRI, Ali *et al.* Laboratory study of the effect of oil-based recycling agents on high RAP asphalt mixtures. **International Journal of Pavement Engineering**, [s. l.], v. 22, n. 11, p. 1423–1434, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1696461>. Acesso em: 3 out. 2024.

MOOMAW, William R. Industrial emissions of greenhouse gases. **Energy Policy**, [s. l.], v. 24, n. 10, Energy and Greenhouse Gas Mitigation: the IPCC Report and Beyond, p. 951–968, 1996. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421596803600>. Acesso em: 3 mar. 2025.

MULLAPUDI, Ramya Sri; APARNA NOOJILLA, Satya Lakshmi; REDDY, Kusam Sudhakar. Fatigue and Healing Characteristics of RAP Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 32, n. 12, p. 04020390, 2020. Disponível em:

<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0003484>. Acesso em: 3 jun. 2023.

MUNN, Zachary *et al.* Systematic review or scoping review? Guidance for authors when choosing between a systematic or scoping review approach. **BMC Medical Research Methodology**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 143, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12874-018-0611-x>. Acesso em: 11 dez. 2023.

MUÑOZ, Santiago; HOSSEINI, M. Reza; CRAWFORD, Robert H. Exploring the environmental assessment of circular economy in the construction industry: A scoping review. **Sustainable Production and Consumption**, [s. l.], v. 42, p. 196–210, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550923002294>. Acesso em: 3 mar. 2025.

MURRAY, Alan; SKENE, Keith; HAYNES, Kathryn. The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. **Journal of Business Ethics**, [s. l.], v. 140, n. 3, p. 369–380, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>. Acesso em: 7 dez. 2023.

NASCIMENTO, L. A. H. **Crêterios Para Flow Number - Camada Final De Revestimento Asfáltico**. [S. l.]: CENPES - PETROBRAS, 2014.

NASCIMENTO, Thalita Cristina Brito. **Efeito dos envelhecimentos termo-oxidativo e foto-oxidativo sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados**. 2016. Mestrado em Infra-Estrutura de Transportes - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-02032016-143912/>. Acesso em: 16 out. 2023.

NASCIMENTO, Luis Alberto Herrmann do. **Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil**. 2015. [s. l.], 2015. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015PhDT.....129N>. Acesso em: 7 jun. 2023.

NASCIMENTO, Thalita Cristina Brito; FAXINA, Adalberto Leandro. Avaliação dos efeitos da radiação ultravioleta sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados com PPA e copolímeros SBS e SBR. **TRANSPORTES**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 73–81, 2017. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1100>. Acesso em: 29 ago. 2023.

NCHRP REPORT 452. **Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method: technician’s manual**. Washington, D.C: National Academy Press, 2001. (NCHRP report, v. no. 452).

NETO, Osires de Medeiros Melo *et al.* Rheological study of asphalt binder modified by cotton and copaiba oils: e315. **Revista Cubana de Ingeniería**, [s. l.], v. 13, n. 1, 2022. Disponível em: <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/816>. Acesso em: 24 ago. 2022.

NFV 08 036. **Microbiology of food and animal feeding stuffs - horizontal method for the enumeration of yeasts and moulds growing on low aw medium**. [S. l.: s. n.], 2003.

Disponível em: https://infostore.saiglobal.com/en-us/Standards/NFV-08-036-2003-67162_SAIG_AFNOR_AFNOR_143004/. Acesso em: 1 jan. 2024.

NG, Andressa Ka Yan. **Evaluation of the fatigue damage behavior of fine aggregate matrices prepared with modified asphalt binders**. 2017. text - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2017. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-03012018-122026/>. Acesso em: 16 out. 2023.

NOBRE, Gustavo Cattelan; TAVARES, Elaine. The quest for a circular economy final definition: A scientific perspective. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 314, p. 127973, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621021910>. Acesso em: 7 dez. 2023.

NORGBEY, Eyram *et al.* Unravelling the efficient use of waste lignin as a bitumen modifier for sustainable roads. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 230, p. 116957, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819323992>. Acesso em: 7 dez. 2023.

NUNES, Leonel J. R. The Rising Threat of Atmospheric CO₂: A Review on the Causes, Impacts, and Mitigation Strategies. **Environments**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 66, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3298/10/4/66>. Acesso em: 3 mar. 2025.

NUÑEZ, Javier Yesid Mahecha; DOMINGOS, Matheus David Inocente; FAXINA, Adalberto Leandro. Susceptibility of low-density polyethylene and polyphosphoric acid-modified asphalt binders to rutting and fatigue cracking. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 73, p. 509–514, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814011337>. Acesso em: 7 jun. 2023.

NUÑEZ, Javier Yesid Mahecha; FAXINA, Adalberto Leandro. Comportamento à fadiga da matriz de agregado fino de misturas asfálticas preparadas com ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho. [s. l.], 2014.

OGBO, Chibuike *et al.* Mixture-based rheological evaluation tool for cracking in asphalt pavements. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 20, n. sup1, p. S299–S314, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1592010>. Acesso em: 17 jun. 2024.

OLDHAM, Daniel J. *et al.* Introducing the critical aging point (CAP) of asphalt based on its restoration capacity. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 278, p. 122379, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821001392>. Acesso em: 25 jun. 2024.

OLDHAM, Daniel *et al.* Transesterification of Waste Cooking Oil to Produce A Sustainable Rejuvenator for Aged Asphalt. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 168, p. 105297, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920306121>. Acesso em: 27 nov. 2024.

OLULEYE, Benjamin I.; CHAN, Daniel W. M.; OLAWUMI, Timothy O. Barriers to circular economy adoption and concomitant implementation strategies in building construction and demolition waste management: A PRISMA and interpretive structural modeling approach. **Habitat International**, [s. l.], v. 126, p. 102615, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0197397522001126>. Acesso em: 7 dez. 2023.

O.NYUMBA, Tobias *et al.* The use of focus group discussion methodology: Insights from two decades of application in conservation. **Methods in Ecology and Evolution**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 20–32, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/2041-210X.12860>. Acesso em: 19 abr. 2025.

OSSIO, Felipe; SALINAS, Carlos; HERNÁNDEZ, Héctor. Circular economy in the built environment: A systematic literature review and definition of the circular construction concept. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 414, p. 137738, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623018966>. Acesso em: 7 dez. 2023.

PAHLAVAN, Farideh; HUNG, Albert; FINI, Elham H. Evolution of molecular packing and rheology in asphalt binder during rejuvenation. **Fuel**, [s. l.], v. 222, p. 457–464, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236118303806>. Acesso em: 27 nov. 2024.

PARTIDO DOS TRABALHADORES. **BNDES e Fundo da Amazônia investem em projeto para quebradeiras de coco babaçu**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://pt.org.br/bndes-e-fundo-da-amazonia-investem-em-projeto-para-quebradeiras-de-coco-babacu/>. Acesso em: 15 out. 2023.

PASANDÍN, A. R.; PÉREZ, I. The influence of the mineral filler on the adhesion between aggregates and bitumen. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, [s. l.], v. 58, p. 53–58, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749615000068>. Acesso em: 20 mar. 2025.

PASCHE, Emilie *et al.* **Study of the RAP characteristics and its applications to pavement layers in southern Brazil**. [S. l.]: Proceedings of the 21st Asphalt Meeting, 2014.

PETERS, Micah D. J. *et al.* Guidance for conducting systematic scoping reviews. **International Journal of Evidence-Based Healthcare**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 141–146, 2015.

PETERS, Micah D. J. *et al.* Updated methodological guidance for the conduct of scoping reviews. **JBI Evidence Synthesis**, [s. l.], v. 18, n. 10, p. 2119, 2020. Disponível em: https://journals.lww.com/jbisrir/fulltext/2020/10000/updated_methodological_guidance_for_the_conduct_of.4.aspx. Acesso em: 14 dez. 2023.

PINTO, Salomão. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. 1991. - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

PLATI, Christina. Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 211, p. 539–555, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819307299>. Acesso em: 7 dez. 2023.

PORRO, Roberto. A economia invisível do babaçu e sua importância para meios de vida em comunidades agroextrativistas. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, [s. l.], v. 14, p. 169–188, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bgoeldi/a/pTzRmXNGf5FVsH8WZjwyc5S/>. Acesso em: 27 maio 2025.

PORTO, Tássila Ramos *et al.* The use of iron oxide in asphalt mixtures to reduce the effects of urban heat islands. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], p. e01709, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522008415>. Acesso em: 1 dez. 2022.

PORTUGAL, Antonio Carlos Xavier *et al.* Evaluating the rheological effect of asphalt binder modification using soybean oil. **Petroleum Science and Technology**, [s. l.], v. 36, n. 17, p. 1351–1360, 2018a. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10916466.2017.1322980>. Acesso em: 21 maio 2023.

PORTUGAL, Antonio Carlos Xavier *et al.* Rheological performance of soybean in asphalt binder modification. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 768–782, 2018b. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1273845>. Acesso em: 21 maio 2023.

PORTUGAL, Antonio Carlos Xavier *et al.* Rheological properties of asphalt binders prepared with maize oil. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 152, p. 1015–1026, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817314101>. Acesso em: 21 maio 2023.

PRADHAN, Sujit Kumar; SAHOO, Umesh Chandra. Performance assessment of aged binder rejuvenated with Polanga oil. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, [s. l.], v. 6, n. 6, p. 608–620, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756417305974>. Acesso em: 23 set. 2022.

PRIEST, Angela. **Calibration of Fatigue Transfer Functions for Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design**. 2005. Thesis[s. l.], 2005. Disponível em: <https://etd.auburn.edu/handle/10415/78>. Acesso em: 8 mar. 2025.

QIAO, Yaning *et al.* Life Cycle Costs Analysis of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Under Future Climate. **Sustainability**, [s. l.], v. 11, n. 19, p. 5414, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/19/5414>. Acesso em: 25 jul. 2024.

RAHMAN, Mohammad Ashiqur *et al.* Evaluation of mix design volumetrics and cracking potential of foamed Warm Mix Asphalt (WMA) containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). **International Journal of Pavement Engineering**, [s. l.], v. 23, n. 10, p. 3454–3466,

2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1902522>. Acesso em: 19 jun. 2023.

RAHMAN, Mohammad A. *et al.* Fatigue and age-related cracking performance of asphalt mixes containing RAP, RAS and recycling agents (RA). **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 466, p. 140302, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061825004507>. Acesso em: 13 abr. 2025.

RAJIB, Amirul I. *et al.* Do all rejuvenators improve asphalt performance?. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 358–376, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1826348>. Acesso em: 29 abr. 2024.

RATHORE, Mukul *et al.* Rheological and chemical evaluation of aging in 100% reclaimed asphalt mixtures containing rejuvenators. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 318, p. 126026, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821037582>. Acesso em: 25 jun. 2024.

RATHORE, Mukul; ZAUMANIS, Martins. Impact of laboratory mixing procedure on the properties of reclaimed asphalt pavement mixtures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 264, p. 120709, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820327148>. Acesso em: 30 set. 2023.

REN, Shisong *et al.* Do different chemical and rheological properties act as effective and critical indicators for efficiency evaluation of rejuvenated bitumen?. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 411, p. 134774, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823044951>. Acesso em: 21 maio 2024.

REN, Shisong *et al.* Toward the long-term aging influence and novel reaction kinetics models of bitumen. **International Journal of Pavement Engineering**, [s. l.], v. 24, n. 2, p. 2024188, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.2024188>. Acesso em: 4 out. 2024.

RODOLFI, Liliana *et al.* Microalgae for oil: Strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor. **Biotechnology and Bioengineering**, [s. l.], v. 102, n. 1, p. 100–112, 2009. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bit.22033>. Acesso em: 30 set. 2023.

RODRIGUES, Julia A. *et al.* Effects of multiple recycling on the performance characteristics of asphalt binder using different recycling agents. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 0, n. 0, p. 1–14, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2268744>. Acesso em: 29 dez. 2023.

ROMÁN, Ángel Francisco Galaviz; KABIR, Golam. Assessing Carbon Dioxide Emissions in Manufacturing Industries: A Systematic Review. **Energies**, [s. l.], v. 17, n. 20, p. 5119, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/20/5119>. Acesso em: 19 abr. 2025.

ROWE, G.; KING, G.; ANDERSON, M. The Influence of Binder Rheology on the Cracking of Asphalt Mixes in Airport and Highway Projects. **Journal of Testing and Evaluation**, [s. l.], v. 42, n. 5, p. 1063–1072, 2014. Disponível em: <https://www.astm.org/jte20130245.html>. Acesso em: 17 jun. 2024.

SABER, I. K.; FARSHAD, F.; FAKHRI, M.; AZAMI, A. Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 165, p. 1125–1132, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261731507X>. Acesso em: 3 out. 2024.

SALES, Airton Ricart Rodrigues de *et al.* Caracterização físico-química do óleo de coco babaçu industrial e artesanal e suas aplicações tecnológicas / Physical and chemical characterization of industrial and handicraft coconut babaçu oil and its technological applications. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 6, n. 5, p. 25734–25748, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/9737>. Acesso em: 16 set. 2023.

SÁNCHEZ, Diana B.; SALDARRIAGA, Juan F.; CARO, Silvia. Chemical and thermodynamic properties of palm oil-based materials and their impact on recycled binder blends. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 348, p. 128490, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182202150X>. Acesso em: 2 mar. 2025.

SANCHEZ-ALONSO, Elsa *et al.* Sustainable Asphalt Mixes: Use of Additives and Recycled Materials. **The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 249–257, 2011. Disponível em: <https://bjrbe-journals.rtu.lv/article/view/bjrbe.2011.32>. Acesso em: 17 set. 2023.

SANTOS, João *et al.* A life cycle assessment of in-place recycling and conventional pavement construction and maintenance practices. **Structure and Infrastructure Engineering**, [s. l.], v. 11, n. 9, p. 1199–1217, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15732479.2014.945095>. Acesso em: 7 dez. 2023.

SANTOS, A. C. dos *et al.* **Estudo prospectivo de óleos vegetais. - Portal Embrapa**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1140622/estudo-prospectivo-de-oleos-vegetais>. Acesso em: 16 out. 2023.

SANTOS, Caio Rubens Gonçalves. **Evaluation of the influences of the type of binder and the volume of voids on the fatigue life of some asphalt mixtures**. 2005. Mestrado em Transportes - University of São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-04102005-084310/>. Acesso em: 1 dez. 2022.

SATHAYE, Jayant; SHUKLA, P. R.; RAVINDRANATH, N. H. Climate change, sustainable development and India: Global and national concerns. **Current Science**, [s. l.], v. 90, n. 3, p. 314–325, 2006. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/24091865>. Acesso em: 3 mar. 2025.

SHARIFI, Naser P. *et al.* Assessing Binder Blending Level in Asphalt Mixtures Containing Recycled Asphalt Shingles. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 31, n. 8, p. 04019144, 2019. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002835>. Acesso em: 30 set. 2023.

SIDAC. Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção - Indicadores de demanda de energia primária e emissão de CO₂, do berço ao portão da fábrica para materiais de construção. , 2022.

SILVA, PH *et al.* **Engineering: Trends and Innovations**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <http://doi.org/10.36599/editpa-978-65-88890-41-7>.

SILVA, Gutemberg Gonçalves da. Estudos reológicos de aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas. [s. l.], 2016. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1290>. Acesso em: 17 jun. 2024.

SILVA, Conrado Cesar Vitorino Pereira da *et al.* Evaluation of the rheological effect of asphalt binder modification using Linum usitatissimum oil. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 27, n. 3, p. e20220138, 2022. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762022000300228&tlng=en. Acesso em: 24 ago. 2022.

SILVA LOPES, Albaniza Maria da *et al.* Impact of aging protocols on asphalt binder behavior: A laboratory and field study. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 19, p. e02629, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509523008094>. Acesso em: 2 dez. 2023.

SILVA PINHEIRO, D. *et al.* Avaliação de parâmetros físico-químicos de óleo de copaíba (copaífera spp) comercializadas em Belém-PA e Bragança-PA. In: 54º CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 2014. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: <https://www.abq.org.br/cbq/2014/trabalhos/7/5158-18456.html>. Acesso em: 1 jan. 2024.

SONG, Weimin; HUANG, Baoshan; SHU, Xiang. Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 192, p. 191–198, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618313118>. Acesso em: 30 ago. 2022.

SREEDHAR, Shashwath; COLERI, Erdem; HADDADI, Sogol Sadat. Selection of a performance test to assess the cracking resistance of asphalt concrete materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 179, p. 285–293, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818313424>. Acesso em: 1 out. 2024.

SU, Jun-Feng *et al.* Investigation the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: In situ rejuvenation for aged bitumen. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 74, p. 83–92, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814011623>. Acesso em: 1 out. 2023.

SU, Jun-Feng; SCHLANGEN, Erik. Synthesis and physicochemical properties of high compact microcapsules containing rejuvenator applied in asphalt. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 198–199, p. 289–300, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894712006845>. Acesso em: 1 out. 2023.

SUBBARAO NAGABHUSHANARAO, Suresha; VIJAYAKUMAR, A. S. Chemical and rheological characteristics of accelerate aged asphalt binders using rolling thin film oven. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 272, p. 121995, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820339994>. Acesso em: 16 out. 2023.

SUN, Bin; ZHOU, Xinxing. Diffusion and Rheological Properties of Asphalt Modified by Bio-Oil Regenerant Derived from Waste Wood. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 04017274, 2018. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002138>. Acesso em: 1 out. 2023.

SUZUKI, Karina *et al.* Evaluation of recycled asphalt mixtures with different RAP contents and the effect of recycling agent. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 0, n. 0, p. 1–13, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2191739>. Acesso em: 29 dez. 2023.

SUZUKI, Karina *et al.* Evaluation of recycled asphalt mixtures with different RAP contents and the effect of recycling agent. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 25, n. sup1, p. 124–136, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2191739>. Acesso em: 30 set. 2024.

TAHERKHANI, Hasan; NOORIAN, Farid. 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**, [s. l.], v. 21, n. 5, p. 1238–1257, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1546220>. Acesso em: 10 ago. 2023.

TAKAHASHI, Marcia Midori. **Avaliação do envelhecimento e rejuvenescimento de ligantes asfálticos**. 2020. text - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-25012021-101332/>. Acesso em: 4 jul. 2023.

TARSI, Giulia; TATARANNI, Piergiorgio; SANGIORGI, Cesare. The Challenges of Using Reclaimed Asphalt Pavement for New Asphalt Mixtures: A Review. **Materials**, [s. l.], v. 13, n. 18, p. 4052, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/18/4052>. Acesso em: 30 set. 2023.

TEH, Soo Huey; WIEDMANN, Thomas; MOORE, Stephen. Mixed-unit hybrid life cycle assessment applied to the recycling of construction materials. **Journal of Economic Structures**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 13, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40008-018-0112-4>. Acesso em: 7 dez. 2023.

TEIXEIRA, Marcos Alexandre. Biomassa de Babaçu no Brasil. **Enc. Energ. Meio Rural**, [s. l.], 2002.

TEYMOURPOUR, Pouya; BAHIA, Hussain. **Linear Amplitude Sweep Test: Binder grading specification and field validation**. [S. l.]: University of Wisconsin-Madison, 2014.

TIZA, Toryila Michael *et al.* Bituminous pavement sustainability improvement strategies. **Energy Nexus**, [s. l.], v. 6, p. 100065, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427122000286>. Acesso em: 2 mar. 2025.

TORRES, Paulo Roberto Barreto *et al.* Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas modificadas com a adição de óleo vegetal residual. **TRANSPORTES**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 2585–2585, 2022. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2585>. Acesso em: 2 dez. 2023.

TURSI, Antonio. A review on biomass: importance, chemistry, classification, and conversion. **Biofuel Research Journal**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 962–979, 2019. Disponível em: https://www.biofueljournal.com/article_88067.html. Acesso em: 30 set. 2023.

UNDERWOOD, Benjamin. **Multiscale Constitutive Modeling of Asphalt Concrete**. 2011. - North Carolina State University, Raleigh, NC, USA, 2011. Disponível em: <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/7217>.

UNITED NATIONS. **Goal 11: Sustainable Cities and Communities**. [S. l.: s. n.], 2023.

VAN DAM, Thomas J. *et al.* **Towards Sustainable Pavement Systems: A Reference Document**. [S. l.: s. n.], 2015. Disponível em: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/38541>. Acesso em: 7 dez. 2023.

VAN DEN BOS, Arno; LIPSCHITS, Daniel. **Biomass business opportunities in Brazil for the Dutch**. [S. l.]: RVO - Netherlands Enterprise Agency, 2015.

VAN STIJN, A. *et al.* A Circular Economy Life Cycle Assessment (CE-LCA) model for building components. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 174, p. 105683, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921002925>. Acesso em: 7 dez. 2023.

VANDEWALLE, David *et al.* Assessment of Eco-Friendly Pavement Construction and Maintenance Using Multi-Recycled RAP Mixtures. **Recycling**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 17, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2313-4321/5/3/17>. Acesso em: 17 set. 2023.

VASSILEV, Stanislav V. *et al.* An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, [s. l.], v. 89, n. 5, p. 913–933, 2010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236109004967>. Acesso em: 30 set. 2023.

VICARI, Sara. The Co-Operative as Institution for Human Development: The Case Study of Coppalj, a Primary Co-Operative in Brazil. **Journal of International Development**, [s. l.], v. 26, n. 5, p. 683–700, 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jid.3003>. Acesso em: 27 maio 2025.

VIDAL, Rosario *et al.* Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v.

74, p. 101–114, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344913000554>. Acesso em: 7 dez. 2023.

VOGT, Markus; WEBER, Christoph. Current challenges to the concept of sustainability. **Global Sustainability**, [s. l.], v. 2, p. e4, 2019. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/global-sustainability/article/current-challenges-to-the-concept-of-sustainability/DCF678F62B270E142077F8138FD60FDB>. Acesso em: 7 dez. 2023.

WANG, Jianling *et al.* Performance and modification mechanism investigation of polyurethane prepolymer system modified bitumen for 100 % reclaimed asphalt pavement (RAP) application. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 462, p. 139882, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061825000297>. Acesso em: 2 mar. 2025.

WANG, Jintao *et al.* The Rejuvenation Effect of Bio-Oils on Long-Term Aged Asphalt. **Materials**, [s. l.], v. 17, n. 13, p. 3316, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/13/3316>. Acesso em: 4 out. 2024.

WANG, Yizhuang David; KESHAVARZI, Behrooz; KIM, Youngsoo Richard. Fatigue Performance Analysis of Pavements with RAP Using Viscoelastic Continuum Damage Theory. **KSCE Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 2118–2125, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12205-018-2648-0>. Acesso em: 3 out. 2024.

WASIQ, Samiulhaq; GOLROO, Amir. Development of a Circular Economy Index for a Pavement Management System. **International Journal of Pavement Research and Technology**, [s. l.], v. 17, n. 5, p. 1327–1339, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42947-023-00304-z>. Acesso em: 1 fev. 2025.

WELLNER, F. *et al.* **High-content RA warm asphalt mixture design**. [S. l.: s. n.], 2015.

WINKE, Paula. Using focus groups to investigate study abroad theories and practice. **System**, [s. l.], v. 71, Special Issue: Study Abroad in Contemporary Times: Toward Greater Methodological Diversity and Innovation, p. 73–83, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0346251X1730790X>. Acesso em: 19 abr. 2025.

WOO, Won Jun; CHOWDHURY, Arif; GLOVER, Charles J. Field Aging of Unmodified Asphalt Binder in Three Texas Long-Term Performance Pavements. **Transportation Research Record**, [s. l.], v. 2051, n. 1, p. 15–22, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2051-03>. Acesso em: 16 out. 2023.

WU, Shaopeng *et al.* UV and Thermal Aging of Pure Bitumen-comparison Between Laboratory Simulation and Natural Exposure Aging. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 9, n. sup1, p. 103–113, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2008.9690161>. Acesso em: 1 set. 2023.

WU, Dayong; YUAN, Changwei; LIU, Hongchao. A risk-based optimisation for pavement preventative maintenance with probabilistic LCCA: a Chinese case. **International Journal of**

Pavement Engineering, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 11–25, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1030743>. Acesso em: 7 dez. 2023.

XIA, Xu; ZHAO, Yongli; TANG, Dong. The state-of-the-art review on the utilization of reclaimed asphalt pavement via hot in-place recycling technology. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 492, p. 144887, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652625002379>. Acesso em: 13 abr. 2025.

XIAO, Feipeng *et al.* A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 180, p. 579–604, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818313928>. Acesso em: 30 set. 2023.

XIE, Zhaoxing *et al.* Effect of rejuvenator types and mixing procedures on volumetric properties of asphalt mixtures with 50% RAP. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 218, p. 457–464, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819312620>. Acesso em: 30 set. 2023.

XIE, Shangxian *et al.* Lignin as Renewable and Superior Asphalt Binder Modifier. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 2817–2823, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b03064>. Acesso em: 1 out. 2023.

XING, Chengwei *et al.* A comprehensive review on the blending condition between virgin and RAP asphalt binders in hot recycled asphalt mixtures: Mechanisms, evaluation methods, and influencing factors. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 398, p. 136515, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262300673X>. Acesso em: 16 set. 2023.

XU, Meng *et al.* Improved Chemical System for Molecular Simulations of Asphalt. **Energy & Fuels**, [s. l.], v. 33, n. 4, p. 3187–3198, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00489>. Acesso em: 1 out. 2023.

XU, Jing *et al.* Rheology measurements of recycling oils and their aging resistance in asphalt binders. **International Journal of Pavement Engineering**, [s. l.], v. 23, n. 6, p. 1707–1722, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1821024>. Acesso em: 30 set. 2023.

XU, Guangji; WANG, Hao; SUN, Wei. Molecular dynamics study of rejuvenator effect on RAP binder: Diffusion behavior and molecular structure. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 158, p. 1046–1054, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817320251>. Acesso em: 1 out. 2023.

YAMAGUCHI, Katsuyuki *et al.* Effects of Film Thickness, Wavelength, and Carbon Black on Photodegradation of Asphalt. **Journal of the Japan Petroleum Institute**, [s. l.], v. 48, n. 3, p. 150–155, 2005.

YAN, Kezhen *et al.* Mechanical performance of asphalt rejuvenated with various vegetable oils. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 293, p. 123485, 2021. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821012459>. Acesso em: 1 out. 2024.

YANG, Chao *et al.* Enhancement mechanism of induction heating on blending efficiency of RAP - virgin asphalt in steel slag recycled asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 269, p. 121318, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820333225>. Acesso em: 20 ago. 2022.

YANG, Rebekah *et al.* Environmental and economic analyses of recycled asphalt concrete mixtures based on material production and potential performance. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 104, p. 141–151, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344915300744>. Acesso em: 17 set. 2023.

YAO, Yuquan *et al.* Blending behavior of reclaimed asphalt and virgin asphalt in recycled asphalt mixtures: A comprehensive analysis on material composition and mixing process. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 465, p. 140229, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061825003770>. Acesso em: 13 abr. 2025.

YI, Junyan *et al.* Mechanisms and research progress on biological rejuvenators for regenerating aged asphalt: Review and discussion. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 422, p. 138622, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623027804>. Acesso em: 1 out. 2023.

YI, Xingyu *et al.* The feasibility of using epoxy asphalt to recycle a mixture containing 100% reclaimed asphalt pavement (RAP). **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 319, p. 126122, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182103854X>. Acesso em: 2 mar. 2025.

YIN, Fan *et al.* Characterising the long-term rejuvenating effectiveness of recycling agents on asphalt blends and mixtures with high RAP and RAS contents. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 18, n. sup4, p. 273–292, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1389074>. Acesso em: 19 abr. 2025.

YORO, Kelvin O.; DARAMOLA, Michael O. CO2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. In: RAHIMPOUR, Mohammad Reza; FARSI, Mohammad; MAKAREM, Mohammad Amin (org.). **Advances in Carbon Capture**. [S. l.]: Woodhead Publishing, 2020. p. 3–28. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128196571000013>. Acesso em: 19 abr. 2025.

YOUSEFI, Afshar *et al.* Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP). **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 268, p. 121200, 2021. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820332049>. Acesso em: 20 ago. 2022.

YU, Yifei *et al.* A systematic literature review on Circular Economy implementation in the construction industry: a policy-making perspective. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 183, p. 106359, 2022a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092134492200204X>. Acesso em: 7 dez. 2023.

YU, Yifei *et al.* Circular economy in the construction industry: A review of decision support tools based on Information & Communication Technologies. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 349, p. 131335, 2022b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622009623>. Acesso em: 7 dez. 2023.

ZADSHIR, Mehdi; HOSSEINNEZHAD, Shahrzad; FINI, Ellie H. Deagglomeration of oxidized asphaltenes as a measure of true rejuvenation for severely aged asphalt binder. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 209, p. 416–424, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819305744>. Acesso em: 1 out. 2023.

ZAHOOR, Muhammad *et al.* Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 278, p. 123304, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620333497>. Acesso em: 17 jun. 2024.

ZARGAR, Majid *et al.* Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 233–234, p. 254–258, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389412006632>. Acesso em: 4 out. 2024.

ZAUMANIS, Martins *et al.* Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 71, p. 538–550, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814009854>. Acesso em: 31 ago. 2022.

ZAUMANIS, Martins; MALLICK, Rajib B.; FRANK, Robert. Evaluation of Rejuvenator's Effectiveness with Conventional Mix Testing for 100% Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures. **Transportation Research Record**, [s. l.], v. 2370, n. 1, p. 17–25, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2370-03>. Acesso em: 30 set. 2023.

ZENG, Wenbo *et al.* The temperature effects in aging index of asphalt during UV aging process. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 93, p. 1125–1131, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181500519X>. Acesso em: 30 ago. 2023.

ZHANG, Derun *et al.* A new short-term aging model for asphalt binders based on rheological activation energy. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 52, n. 4, p. 68, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1364-7>. Acesso em: 15 dez. 2023.

ZHANG, Jizhe *et al.* Evaluation on the mechanical performance of recycled asphalt mixtures incorporated with high percentage of RAP and self-developed rejuvenators. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 269, p. 121337, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820333419>. Acesso em: 16 set. 2023.

ZHANG, Xu-Xiang *et al.* Microbial PAH-Degradation in Soil: Degradation Pathways and Contributing Factors¹ Project supported by the National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China (No. 2001AA214191). **Pedosphere**, [s. l.], v. 16, n. 5, p. 555–565, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100201600660088X>. Acesso em: 30 set. 2023.

ZHANG, Henglong *et al.* Physical, rheological and chemical characterization of aging behaviors of thermochromic asphalt binder. **Fuel**, [s. l.], v. 211, p. 850–858, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623611731219X>. Acesso em: 16 out. 2023.

ZHANG, Xuefei *et al.* Preparation of bio-oil and its application in asphalt modification and rejuvenation: A review of the properties, practical application and life cycle assessment. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 262, p. 120528, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820325332>. Acesso em: 1 out. 2023.

ZHANG, Ran *et al.* The impact of bio-oil as rejuvenator for aged asphalt binder. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 196, p. 134–143, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818325789>. Acesso em: 1 out. 2023.

ZHANG, Fan *et al.* Utilizing Steelmaking By-Products for Pavement Deicing: A Sustainable Waste Management Approach in Circular Economy. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-025-02917-w>. Acesso em: 13 abr. 2025.

ZHANG, Kun; HUCHET, Florian; HOBBS, Andrew. A review of thermal processes in the production and their influences on performance of asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement (RAP). **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 206, p. 609–619, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181930354X>. Acesso em: 19 jun. 2023.

ZHANG, Yan; YANG, Zhifeng; YU, Xiangyi. Urban Metabolism: A Review of Current Knowledge and Directions for Future Study. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 49, n. 19, p. 11247–11263, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03060>. Acesso em: 2 mar. 2025.

ZHAO, Weitian; QIAN, Guoping; YANG, Qun. Sustainable pavement design: A comprehensive study on incorporating 100 % recycled asphalt pavement and utilizing 100 % industrial solid waste. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 462, p. 139972, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061825001205>. Acesso em: 13 abr. 2025.

ZHAO, Zifeng; XIAO, Feipeng; AMIRKHANIAN, Serji. Recent applications of waste solid materials in pavement engineering. **Waste Management**, [s. l.], v. 108, p. 78–105, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X20301872>. Acesso em: 7 dez. 2023.

ZHAO, Weitian; YANG, Qun. Design and performance evaluation of a new green pavement: 100% recycled asphalt pavement and 100% industrial solid waste. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 421, p. 138483, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623026410>. Acesso em: 16 set. 2023.

ZHOU, Zhou *et al.* Fatigue cracking performance evaluation of laboratory-produced polymer modified asphalt mixture containing reclaimed asphalt pavement material. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 216, p. 379–389, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819311900>. Acesso em: 3 out. 2024.

ZHU, Junqing *et al.* Experimental study of high modulus asphalt mixture containing reclaimed asphalt pavement. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 263, p. 121447, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620314943>. Acesso em: 30 set. 2023.

ZIMMERMANN, Nils. **Os 5 maiores problemas ambientais do mundo e suas soluções – DW**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/os-cinco-maiores-problemas-ambientais-do-mundo-e-suas-solu%C3%A7%C3%B5es/a-36024985>. Acesso em: 3 mar. 2025.

ZYLBERSZTAJN, D. *et al.* **Reorganização do agronegócio do babaçu no estado do Maranhão**. [S. l.]: Grupo Pensa-USP, 2000a.

ZYLBERSZTAJN, D. *et al.* **Reorganização do agronegócio do babaçu no estado do Maranhão**. São Paulo: Relatório técnico Grupo Pensa-USP, 2000b.

APÊNDICE A

A 1 - Composição Unitária de Custos para a etapa de produção da mistura asfáltica de controle - 0%RAP(0%BO).

CGCIT				DNIT				
SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO				Paraíba				
Custo Unitário de Referência				Abril/2024		Produção		
Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais						1,00 t		
6416078						Valores em Reais (R\$)		
A - EQUIPAMENTOS		Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo	Horário
			Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	Total	
E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 KW	0,010	1,00	0,00	70,5071	40,4955	0,71	
E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72m³ - 113 KW	0,010	0,81	0,19	198,5919	98,7260	1,80	
E9021	Grupo gerador - 456 KVA	0,010	1,00	0,00	397,8462	23,8665	3,98	
E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	0,020	1,00	0,00	56,5420	38,6223	1,13	
E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 KW	0,010	1,00	0,00	1240,38	656,3728	12,40	
Custo horário total de equipamentos							20,01	
B - MÃO DE OBRA		Quantidade	Unidade		Custo Horário		Custo	Horário
P9824	Servente	0,040	h		19,5534		0,782136	
Custo horário total de mão de obra							0,92	
Custo horário total de mão de execução							20,93	
Custo unitário total de execução							20,93	
							Custo FIC	do
							Custo FIT	do
								-
C - MATERIAL		Quantidade	Unidade		Preço Unitário		Custo Unitário	
M0028	Areia média	0,047625	m³		122,6757		5,8424	
M0191	Brita 1 (12,5mm)	0,257175	m³		153,8375		39,5632	
M0191	Brita 1 (19,0mm)	0,142875	m³		153,8375		21,9795	
M0344	Cal hidratada - a	19,05000	Kg		0,5358		10,2070	

M1943	granel Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	0,047500	t	3850,0000	182,8750		
M1135	Pó de pedra	0,485775	m³	179,6208	87,2553		
Custo horário total de material				347,72			
D - ATIVIDADES AUXILIARES		Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário		
Custo unitário total de atividades auxiliares				0,00			
Subtotal				388,66			
E - TEMPO FIXO		Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		
M0028	Areia média - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,047625	t	1,73	0,0823	
M0191	Brita 1(12,5mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,257175	t	1,73	0,4449	
	Brita 1(19,0mm) - Caminhão basculante 10 m³						
M0191	Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³	5914647	0,142875	t	1,73	0,2471	
M0344	m³	5914363	0,01905	t	17,19	0,3274	
M1135	Pó de pedra - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,485775	t	1,73	0,8403	
Custo unitário total de tempo fixo				1,94			
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Código	Quantidade	Unidade	DMT P	Custo Unitário	Custo Unitário
M0028	Areia média - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,047625	tkm	50,0	1,19	2,8336
M0191	Brita 1(12,5mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,257175	tkm	50,0	1,19	15,3019
	Brita 1(19,0mm) - Caminhão basculante 10 m³						
M0191	Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³	5914359	0,142875	tkm	50,0	1,19	8,5010
M0344	m³	5914359	0,019050	tkm	50,0	0,60	0,57150
M1135	Pó de pedra - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,485775	tkm	50,0	1,71	41,5337
M1943	CAP 50/70 – Caminhão tanque 13.000 l	SINAPI	0,047500	tkm	50,0	1,84	4,37000
		93177					
Custo unitário total de transporte				73,11			
Custo unitário direto total				463,71			

A 2 - Composição Unitária de Custos para a etapa de produção da mistura asfáltica reciclada – 15%RAP(0%BO).

CGCIT

DNIT

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO				Paraíba			
Custo Unitário de Referência			Abril/2024		Produção		1,00 t
6416098	Usinagem de concreto asfáltico reciclado em usina com adição de material fresado e brita comercial						Valores em Reais (R\$)
A - EQUIPAMENTOS		Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total
			Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	
E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 KW	0,010	1,00	0,00	70,5071	40,4955	0,71
E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72m³ - 113 KW	0,010	0,88	0,12	198,5919	98,7260	1,87
E9021	Grupo gerador - 456 KVA	0,010	1,00	0,00	397,8462	23,8665	3,98
E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	0,020	1,00	0,00	56,5420	38,6223	1,13
E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 KW	0,004	1,00	0,00	1240,3798	656,3728	4,96
		Custo horário total de equipamentos					12,64
B - MÃO DE OBRA		Quantidade	Unidade		Custo Horário		Custo Horário Total
P9824	Servente	0,040	h		19,5334		0,79
		Custo horário total de mão de obra					0,92
		Custo horário total de mão de execução					13,56
		Custo unitário total de execução					13,56
							Custo do FIC
							Custo do FIT
							-
							-
C - MATERIAL		Quantidade	Unidade		Preço Unitário		Custo Unitário
M0028	Areia média	0,000	m³		122,6757		0,0000
M0191	Brita 1 (12,5mm)	0,1624	m³		153,8375		24,9755
M0191	Brita 1 (19,0mm)	0,1433	m³		153,8375		22,0372
M0344	Cal hidratada - a granel	28,6500	kg		0,5358		15,3507
M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	0,0450	t		3850,00		173,2500
M1135	Pó de pedra	0,4775	m³		179,6208		85,7689
	RAP	0,1433	m³		0,00		0,00
		Custo horário total de material					321,38

D - ATIVIDADES AUXILIARES		Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário	
		Custo unitário total de atividades auxiliares				0,00	
		Subtotal				347,58	
E - TEMPO FIXO		Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		
M0191	Brita 1(12,5mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,1624	t	1,73	0,2809	
M0191	Brita 1(19,0mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,1433	t	1,73	0,2479	
M0344	Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³	5914363	0,0287	t	17,19	0,4933	
M1135	Pó de pedra – Caminhão basculante 10 m³	5914363	0,4775	t	1,73	0,8260	
M2093	RAP - Caminhão basculante 10 m³	5915407	0,1433	t	2,69	0,3854	
		Custo unitário total de tempo fixo				2,23	
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Código	Quantidade	Unidade	DMT P	Custo Unitário	Custo Unitário
M0191	Brita 1(12,5mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,1624	tkm	50,0	1,19	9,6628
M0191	Brita 1(19,0mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,1433	tkm	50,0	1,19	8,5263
M0344	Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³	5914366	0,0287	tkm	50,0	0,60	0,861
M1135	Pó de pedra - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,4775	tkm	50,0	1,71	40,8262
M2093	RAP - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,1433	tkm	50,0	1,19	8,5263
M1943	CAP 50/70 – Caminhão tanque 13.000 l	SINAPI 93177	0,0450	tkm	50,0	1,84	4,14
		Custo unitário total de transporte					72,53
		Custo unitário direto total					422,34

A 3 - Composição Unitária de Custos para a etapa de produção da mistura asfáltica reciclada – 56%RAP(3%BO).

CGCIT				DNIT			
SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO			Paraíba				
Custo Unitário de Referência			Abril/2024		Produção	1,00	t
6416098 Usinagem de concreto asfáltico reciclado em usina com adição de material fresado e brita comercial			Valores em Reais (R\$)				
A - EQUIPAMENTOS		Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total
			Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	
E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 KW	0,010	1,00	0,00	70,5071	40,4955	0,71
E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72m³ - 113 KW	0,010	0,88	0,12	198,5919	98,7260	1,87
E9021	Grupo gerador - 456 KVA	0,010	1,00	0,00	397,8462	23,8665	3,98
E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	0,020	1,00	0,00	56,5420	38,6223	1,13
E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 KW	0,004	1,00	0,00	1240,3798	656,3728	4,96
		Custo horário total de equipamentos					12,64
B - MÃO DE OBRA		Quantidade	Unidade		Custo Horário		Custo Horário Total
P9824	Servente	0,040	h		19,5334		0,79
		Custo horário total de mão de obra					0,92
		Custo horário total de mão de execução					13,56
		Custo unitário total de execução					13,56
		Custo do FIC					-
		Custo do FIT					-
C - MATERIAL		Quantidade	Unidade		Preço Unitário		Custo Unitário
M0028	Areia média	0,000	m³		122,6757		0,0000
M0191	Brita 1 (12,5mm)	0,1544	m³		153,8375		23,7525
M0191	Brita 1 (19,0mm)	0,0965	m³		153,8375		14,8453
M0344	Cal hidratada - a granel	28,9500	kg		0,5358		15,5114
M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	0,0340	t		3850,00		130,7075
M1135	Pó de pedra	0,1448	m³		179,6208		26,0001
	RAP	0,5404	m³		0,00		0,0000

-	Óleo de babaçu	0,0011	t	27590,00	28,9695	
		Custo horário total de material			210,82	
D - ATIVIDADES AUXILIARES		Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário	
		Custo unitário total de atividades auxiliares			0,00	
		Subtotal			237,02	
E - TEMPO FIXO		Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	
M0191	Brita 1(12,5mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,1544	t	1,73	0,2671
M0191	Brita 1(19,0mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,0965	t	1,73	0,1669
M0344	Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³	5914363	0,0289	t	17,19	0,4967
M1135	Pó de pedra – Caminhão basculante 10 m³	5914363	0,1448	t	1,73	0,2505
M2093	RAP - Caminhão basculante 10 m³	5915407	0,5404	t	2,69	1,4536
		Custo unitário total de tempo fixo			2,63	
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Código	Quantidade	Unidade	DMT P	Custo Unitário
M0191	Brita 1(12,5mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,1544	tkm	50,0	9,1868
M0191	Brita 1(19,0mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,0965	tkm	50,0	5,7417
M0344	Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³	5914366	0,0289	tkm	50,0	0,867
M1135	Pó de pedra - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,1448	tkm	50,0	12,3804
M2093	RAP - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,5404	tkm	50,0	32,1538
M1943	CAP 50/70 – Caminhão tanque 13.000 l	SINAPI 93177	0,0340	tkm	50,0	3,1280
-	Óleo de babaçu – Caminhão tanque 13.000 l	SINAPI 93177	0,0011	tkm	50,0	0,1012
		Custo unitário total de transporte			63,55	
		Custo unitário direto total			303,20	

A 4 - Composição Unitária de Custos para a etapa de produção da mistura asfáltica reciclada – 63%RAP(5%BO).

CGCIT					DNIT		
SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO			Paraíba				
Custo Unitário de Referência			Abril/2024		Produção	1,00	t
6416098 Usinagem de concreto asfáltico reciclado em usina com adição de material fresado e brita comercial			Valores em Reais (R\$)				
A - EQUIPAMENTOS		Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total
			Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	
E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 KW	0,010	1,00	0,00	70,5071	40,4955	0,71
E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72m³ - 113 KW	0,010	0,88	0,12	198,5919	98,7260	1,87
E9021	Grupo gerador - 456 KVA	0,010	1,00	0,00	397,8462	23,8665	3,98
E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	0,020	1,00	0,00	56,5420	38,6223	1,13
E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 KW	0,004	1,00	0,00	1240,3798	656,3728	4,96
		Custo horário total de equipamentos					12,64
B - MÃO DE OBRA		Quantidade	Unidade		Custo Horário		Custo Horário Total
P9824	Servente	0,040	h		19,5334		0,79
		Custo horário total de mão de obra					0,92
		Custo horário total de mão de execução					13,56
		Custo unitário total de execução					13,56
							Custo do FIC
							Custo do FIT
							-
							-
C - MATERIAL		Quantidade	Unidade		Preço Unitário		Custo Unitário
M0028	Areia média	0,0000	m³		122,6757		0,0000
M0191	Brita 1 (12,5mm)	0,1158	m³		153,8375		17,8144
M0191	Brita 1 (19,0mm)	0,1158	m³		153,8375		17,8144
M0344	Cal hidratada - a granel	28,9500	kg		0,5358		15,5114
M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	0,0333	t		3850,00		128,0125
M1135	Pó de pedra	0,0965	m³		179,6208		17,3334
	RAP	0,6080	m³		0,00		0,0000

-	Óleo de babaçu	0,0018	t	27590,00	48,2825	
		Custo horário total de material			196,49	
D - ATIVIDADES AUXILIARES		Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário	
		Custo unitário total de atividades auxiliares			0,00	
		Subtotal			222,69	
E - TEMPO FIXO		Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	
M0191	Brita 1(12,5mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,1158	t	1,73	0,2003
M0191	Brita 1(19,0mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,1158	t	1,73	0,2003
M0344	Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³	5914363	0,0289	t	17,19	0,4967
M1135	Pó de pedra – Caminhão basculante 10 m³	5914363	0,0965	t	1,73	0,1669
M2093	RAP - Caminhão basculante 10 m³	5915407	0,6080	t	2,69	1,6355
		Custo unitário total de tempo fixo			2,70	
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Código	Quantidade	Unidade	DMT P	Custo Unitário
M0191	Brita 1(12,5mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,1158	tkm	50,0	6,8901
M0191	Brita 1(19,0mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,1158	tkm	50,0	6,8901
M0344	Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³	5914366	0,0289	tkm	50,0	0,8670
M1135	Pó de pedra - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,0965	tkm	50,0	8,2507
M2093	RAP - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,6080	tkm	50,0	36,1760
M1943	CAP 50/70 – Caminhão tanque 13.000 l	SINAPI 93177	0,0333	tkm	50,0	3,0636
-	Óleo de babaçu – Caminhão tanque 13.000 l	SINAPI 93177	0,0018	tkm	50,0	0,1656
		Custo unitário total de transporte			62,29	
		Custo unitário direto total			287,68	

A 5 - Composição Unitária de Custos para a etapa de produção da mistura asfáltica reciclada – 70%RAP(7%BO).

CGCIT

DNIT

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO				Paraíba			
Custo Unitário de Referência				Abril/2024	Produção	1,00	t
6416098	Usinagem de concreto asfáltico reciclado em usina com adição de material fresado e brita comercial						Valores em Reais (R\$)
A - EQUIPAMENTOS		Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total
			Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	
E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 KW	0,010	1,00	0,00	70,5071	40,4955	0,71
E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72m³ - 113 KW	0,010	0,88	0,12	198,5919	98,7260	1,87
E9021	Grupo gerador - 456 KVA	0,010	1,00	0,00	397,8462	23,8665	3,98
E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	0,020	1,00	0,00	56,5420	38,6223	1,13
E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 KW	0,004	1,00	0,00	1240,3798	656,3728	4,96
		Custo horário total de equipamentos					12,64
B - MÃO DE OBRA		Quantidade	Unidade	Custo Horário		Custo Horário Total	
P9824	Servente	0,040	h	19,5334		0,79	
		Custo horário total de mão de obra					0,92
		Custo horário total de mão de execução					13,56
		Custo unitário total de execução					13,56
							Custo do FIC
							Custo do FIT
C - MATERIAL		Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário	
M0028	Areia média	0,0000	m³	122,6757		0,0000	
M0191	Brita 1 (12,5mm)	0,1351	m³	153,8375		20,7834	
M0191	Brita 1 (19,0mm)	0,1255	m³	153,8375		19,2989	
M0344	Cal hidratada - a granel	28,9500	kg	0,5358		15,5114	
M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	0,0326	t	3850,00		125,3175	
M1135	Pó de pedra	0,0000	m³	179,6208		0,0000	
	RAP	0,6755	m³	0,00		0,0000	

-	Óleo de babaçu	0,0025	t	27590,00	67,5955		
		Custo horário total de material			180,91		
D - ATIVIDADES AUXILIARES		Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário		
		Custo unitário total de atividades auxiliares			0,00		
		Subtotal			207,11		
E - TEMPO FIXO		Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		
M0191	Brita 1(12,5mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,1351	t	1,73	0,2337	
M0191	Brita 1(19,0mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,1255	t	1,73	0,2171	
M0344	Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³	5914363	0,0289	t	17,19	0,4967	
M1135	Pó de pedra – Caminhão basculante 10 m³	5914363	0,0000	t	1,73	0,0000	
M2093	RAP - Caminhão basculante 10 m³	5915407	0,6755	t	2,69	1,8170	
		Custo unitário total de tempo fixo			2,76		
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Código	Quantidade	Unidade	DMT P	Custo Unitário	Custo Unitário
M0191	Brita 1(12,5mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,1351	tkm	50,0	1,19	8,0384
M0191	Brita 1(19,0mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,1255	tkm	50,0	1,19	7,4672
M0344	Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³	5914366	0,0289	tkm	50,0	0,60	0,8670
M1135	Pó de pedra - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,0000	tkm	50,0	1,71	0,0000
M2093	RAP - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,6755	tkm	50,0	1,19	40,1922
M1943	CAP 50/70 – Caminhão tanque 13.000 l	SINAPI 93177	0,0326	tkm	50,0	1,84	2,9992
-	Óleo de babaçu – Caminhão tanque 13.000 l	SINAPI 93177	0,0025	tkm	50,0	1,84	0,2300
		Custo unitário total de transporte			59,78		
		Custo unitário direto total			269,65		

A 6 - Composição Unitária de Custos para a etapa de construção do revestimento do pavimento utilizando a mistura asfáltica de controle - 0%RAP(0%BO).

CGCIT

DNIT

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO			São Paulo		FIC	0,00453		
Custo Unitário de Referência			Outubro/2022		Produção:	1,00	t	
4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais						Valores em reais (R\$)	
A - EQUIPAMENTOS			Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo
				Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	Horário Total
E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	0,010	0,71	0,29	236,79	109,41	2,01	
E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	0,010	0,82	0,18	278,33	95,95	2,46	
E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	0,010	1,00	0,00	334,39	143,84	3,36	
Custo horário total de equipamentos							7,83	
B - MÃO DE OBRA		Quantidade	Unidade		Custo Horário	Custo Horário Total		
P9824	Servente	0,080	h		23,00	1,85		
Custo horário total de mão de obra							1,85	
Custo horário total de execução							9,68	
Custo unitário total de execução							11,53	
Custo do FIC							0,00453	
Custo do FIT							-	
C - MATERIAL		Quantidade	Unidade		Preço Unitário	Custo Unitário		
Custo unitário total de material							0,00	
D - ATIVIDADES AUXILIARES		Quantidade	Unidade		Custo Unitário	Custo Unitário		
6416078	Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita	1,020	t		463,71	471,54		

comerciais

Custo unitário total de atividades auxiliares					11,534		
Subtotal					483,07		
E - TEMPO FIXO		Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		
6416078	Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - Caminhão basculante 10 m³	5914649	1,020	t	7,53		7,68
Custo unitário total de tempo fixo					7,68		
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Código	Quantidade	Unidade	DMT P	Custo Unitário	Custo Unitário
6416078	Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - Caminhão basculante 10 m³	5914359	1,020	tkm	50,0	1,19	60,69
Custo unitário total de transporte					60,69		
Custo unitário direto total					551,44		

A 7 - Composição Unitária de Custos para a etapa de construção do revestimento do pavimento utilizando misturas asfálticas recicladas.

CGCIT

DNIT

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO						São Paulo	FIC						0,00453
Custo Unitário de Referência						Outubro/2022	Produção:						1,00 t
4011478 Concreto asfáltico reciclado em usina com adição de asfalto - brita comercial							Valores em reais (R\$)						
A - EQUIPAMENTOS		15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Utilização		Custo Horário		15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
		Quant	Quant	Quant	Quant	Operat.	Improd.	Produ.	Improd.	Custo Total	H	Custo Total	H
E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	0,010	0,010	0,010	0,010	0,71	0,29	236,79	109,41	2,01	2,01	2,01	2,01
E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	0,010	0,010	0,010	0,010	0,82	0,18	278,33	95,95	2,46	2,46	2,46	2,46
E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	0,010	0,010	0,010	0,010	1,00	0,00	334,39	143,84	3,36	3,36	3,36	3,36
Custo horário total de equipamentos										7,83	7,83	7,83	7,83
B - MÃO DE OBRA		15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Unid.	Custo Horário			15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
		Quant	Quant	Quant	Quant					Custo Total	H	Custo Total	H
P9824	Servente	0,080	0,080	0,080	0,080	h		23,00	Custo horário total de mão de obra	1,85	1,85	1,85	1,85
Custo horário total de execução										9,68	9,68	9,68	9,68
Custo unitário total de execução:										9,68	9,68	9,68	9,68
Custo do FIC										0,00453	0,00453	0,00453	0,00453
Custo do FIT										-			
C - MATERIAL		15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Unid	Preço Unitário			15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)

		Quant	Quant	Quant	Quant					Custo Unitário	Custo Unitário	Custo Unitário	Custo Unitário	
Custo unitário total de material										0,00	0,00	0,00	0,00	
D - ATIVIDADES AUXILIARES		15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Unid	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
		Quant	Quant	Quant	Quant		Custo Unitário	Custo Unitário	Custo Unitário	Custo Unitário	Custo Unitário	Custo Unitário	Custo Unitário	Custo Unitário
6416098	Usinagem de concreto asfáltico reciclado em usina fixa com adição de material fresado e brita comercial	1,020				t	422,34	303,20	287,68	269,65	430,17	311,03	295,51	277,48
Custo unitário total de atividades auxiliares										430,17	311,03	259,51	277,48	
Subtotal											439,85	320,71	269,19	287,16
E - TEMPO FIXO	Cód	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Unid					15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
		Quant	Quant	Quant	Quant						Custo Unitário	Custo Unitário	Custo Unitário	Custo Unitário
6416098	Usinagem de concreto asfáltico reciclado em usina fixa com adição de material fresado e brita comercial - Caminhão basculante 10 m³	5914649	1,020	1,020	1,020	1,020	t		7,53		7,68	7,68	7,68	7,68
Custo unitário total de tempo fixo										7,68	7,68	7,68	7,68	
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Cód	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Unidade	DMT				15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
		Quant	Quant	Quant	Quant				Custo Unitário		Custo Unitário	Custo Unitário	Custo Unitário	Custo Unitário
6416098	Usinagem de concreto asfáltico reciclado em usina fixa com adição de material fresado e brita comercial - Caminhão basculante 10 m³	5914359	1,020	1,020	1,020	1,020	tkm	50	1,19		60,69	60,69	60,69	60,69
Custo unitário total de transporte										60,69	60,69	60,69	60,69	
Custo unitário direto total										508,22	389,08	337,56	355,53	

APÊNDICE B

B 1 - Determinação do fator de utilidade X^1 .

Ensaio	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Fator de utilidade	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
FN	302,00	732,00	3721,00	2928,00	2088,00	F(FN)	1,00	2,42	12,32	9,70	6,91
FTI	1208,50	53068,50	35513,50	81391,50	99751,00	F(FTI)	1,00	175,72	117,59	269,51	330,30
Fator de utilidade das misturas							1,00	425,93	1448,90	2612,98	2283,67
Fator de utilidade das misturas (corrigido)							0,9000	0,0021	0,0006	0,0003	0,0004

B 2 - Determinação do fator de utilidade X^2 .

Ensaio	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Fator de utilidade	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
RTI	1,14	1,28	1,65	1,35	1,15	F(RTI)	1,00	1,12	1,45	1,18	1,01
RRTI	87,01	85,08	84,98	90,97	92,33	F(RRTI)	1,00	0,98	0,98	1,05	1,06
A	10,41	10,63	11,86	8,54	6,46	F(A)	1,00	0,98	0,88	1,22	1,61
FN	302,00	732,00	3721,00	2928,00	2088,00	F(FN)	1,00	2,42	12,32	9,70	6,91
FTI	1208,50	53068,50	35513,50	81391,50	99751,00	F(FTI)	1,00	43,91	29,39	67,35	82,54
Fator de utilidade das misturas							1,00	114,44	449,25	985,48	984,42
Fator de utilidade das misturas (corrigido)							0,9000	0,0079	0,0020	0,0009	0,0009

B 3 - Determinação do fator de utilidade X³.

Ensaio	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Fator de utilidade	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
RTI	1,14	1,28	1,65	1,35	1,15	F(RTI)	1,00	1,12	1,45	1,18	1,01
RRTI	87,01	85,08	84,98	90,97	92,33	F(RRTI)	1,00	0,98	0,98	1,05	1,06
MR	3908,00	5073,00	7143,00	6317,00	5557,00	F(MR)	1,00	1,30	1,83	1,62	1,42
A	10,41	10,63	11,86	8,54	6,46	F(A)	1,00	1,02	1,14	0,82	0,62
FN	302,00	732,00	3721,00	2928,00	2088,00	F(FN)	1,00	2,42	12,32	9,70	6,91
FTI	1208,50	53068,50	35513,50	81391,50	99751,00	F(FTI)	1,00	43,91	29,39	67,35	82,54
Fator de utilidade das misturas							1,00	154,90	1065,83	1072,06	539,05
Fator de utilidade das misturas (corrigido)							0,9000	0,0058	0,0008	0,0008	0,0017

B 4 - Determinação do fator de utilidade X⁴.

Ensaio	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Fator de utilidade	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
RTI	1,14	1,28	1,65	1,35	1,15	F(RTI)	1,00	1,12	1,45	1,18	1,01
MR	3908,00	5073,00	7143,00	6317,00	5557,00	F(MR)	1,00	1,30	1,83	1,62	1,42
FTI	1208,50	53068,50	35513,50	81391,50	99751,00	F(FTI)	1,00	43,91	29,39	67,35	82,54
Fator de utilidade das misturas							1,00	64,00	77,74	128,92	118,40
Fator de utilidade das misturas (corrigido)							0,9000	0,0141	0,0116	0,0070	0,0076

B 5 - Determinação do fator de utilidade X⁵.

Ensaio	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Fator de utilidade	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
RTI	1,14	1,28	1,65	1,35	1,15	F(RTI)	1,00	1,12	1,45	1,18	1,01
MR	3908,00	5073,00	7143,00	6317,00	5557,00	F(MR)	1,00	1,30	1,83	1,62	1,42
FN	302,00	732,00	3721,00	2928,00	2088,00	F(FN)	1,00	2,42	12,32	9,70	6,91
FTI	1208,50	53068,50	35513,50	81391,50	99751,00	F(FTI)	1,00	43,91	29,39	67,35	82,54
Fator de utilidade das misturas							1,00	155,13	957,87	1249,92	818,60
Fator de utilidade das misturas (corrigido)							0,9000	0,0058	0,0009	0,0007	0,0011

B 6 - Determinação do fator de utilidade X⁶.

Ensaio	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Fator de utilidade	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
RTI	1,14	1,28	1,65	1,35	1,15	F(RTI)	1,00	1,12	1,45	1,18	1,01
FN	302,00	732,00	3721,00	2928,00	2088,00	F(FN)	1,00	2,42	12,32	9,70	6,91
FTI	1208,50	53068,50	35513,50	81391,50	99751,00	F(FTI)	1,00	43,91	29,39	67,35	82,54
Fator de utilidade das misturas							1,00	119,51	524,06	773,26	575,69
Fator de utilidade das misturas (corrigido)							0,9000	0,0075	0,0017	0,0012	0,0016

B 7 - Determinação do fator de utilidade X⁷.

Ensaio	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Fator de utilidade	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
RTI	1,14	1,28	1,65	1,35	1,15	F(RTI)	1,00	1,12	1,45	1,18	1,01
FTI	1208,50	53068,50	35513,50	81391,50	99751,00	F(FTI)	1,00	43,91	29,39	67,35	82,54
Fator de utilidade das misturas							1,00	49,31	42,53	79,76	83,27
Fator de utilidade das misturas (corrigido)							0,9000	0,0183	0,0212	0,0113	0,0108

B 8 - Determinação do fator de utilidade X⁸.

Ensaio	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Fator de utilidade	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
RTI	1,14	1,28	1,65	1,35	1,15	F(RTI)	1,00	1,12	1,45	1,18	1,01
MR	3908,00	5073,00	7143,00	6317,00	5557,00	F(MR)	1,00	1,30	1,83	1,62	1,42
Fator de utilidade das misturas							1,00	1,46	2,65	1,91	1,43
Fator de utilidade das misturas (corrigido)							0,9000	0,6175	0,3402	0,4702	0,6274

B 9 - Determinação do fator de utilidade X⁹.

Ensaio	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Fator de utilidade	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
RTI	1,14	1,28	1,65	1,35	1,15	F(RTI)	1,00	1,12	1,45	1,18	1,01
Fator de utilidade das misturas							1,00	1,12	1,45	1,18	1,01
Fator de utilidade das misturas (corrigido)							0,9000	0,8016	0,6218	0,7600	0,8922

B 10 - Determinação do fator de utilidade X¹⁰.

Ensaio	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Fator de utilidade	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
FTI	1208,50	53068,50	35513,50	81391,50	99751,00	F(FTI)	1,00	43,91	29,39	67,35	82,54
Fator de utilidade das misturas							1,00	43,91	29,39	67,35	82,54
Fator de utilidade das misturas (corrigido)							0,9000	0,0205	0,0306	0,0134	0,0109

B 11 - Determinação do fator de utilidade X¹¹.

Ensaio	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Fator de utilidade	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
FN	302,00	732,00	3721,00	2928,00	2088,00	F(FN)	1,00	2,42	12,32	9,70	6,91
						Fator de utilidade das misturas	1,00	2,42	12,32	9,70	6,91
						Fator de utilidade das misturas (corrigido)	0,9000	0,3713	0,0730	0,0928	0,1302

B 12 - Determinação do fator de utilidade X¹².

Ensaio	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Fator de utilidade	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
RTI	1,14	1,28	1,65	1,35	1,15	F(RTI)	1,00	1,12	1,45	1,18	1,01
FN	302,00	732,00	3721,00	2928,00	2088,00	F(FN)	1,00	2,42	12,32	9,70	6,91
						Fator de utilidade das misturas	1,00	2,72	17,83	11,48	6,97
						Fator de utilidade das misturas (corrigido)	0,9000	0,3307	0,0505	0,0784	0,1290

B 13 - Determinação do fator de utilidade X¹³.

Ensaio	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)	Fator de utilidade	0%RAP (0%BO)	15%RAP (0%BO)	56%RAP (3%BO)	63%RAP (5%BO)	70%RAP (7%BO)
RTI	1,14	1,28	1,65	1,35	1,15	F(RTI)	1,00	1,12	1,45	1,18	1,01
MR	3908,00	5073,00	7143,00	6317,00	5557,00	F(MR)	1,00	1,30	1,83	1,62	1,42
A	10,41	10,63	11,86	8,54	6,46	F(A)	1,00	1,02	1,14	0,82	0,62
FN	302,00	732,00	3721,00	2928,00	2088,00	F(FN)	1,00	2,42	12,32	9,70	6,91
FTI	1208,50	53068,50	35513,50	81391,50	99751,00	F(FTI)	1,00	43,91	29,39	67,35	82,54
						Fator de utilidade das misturas	1,00	158,41	1091,29	1025,39	507,99
						Fator de utilidade das misturas (corrigido)	0,9000	0,0057	0,0008	0,0009	0,0018