CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FRANCIANE PRIMO DE OLIVEIRA

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE RAP EM MISTURAS ASFÁLTICAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE O *BALANCED MIX DESIGN* (BMD), O CONTROLE DE VARIABILIDADE E A TRANSIÇÃO NORMATIVA BRASILEIRA

BELO HORIZONTE

2026

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE RAP EM MISTURAS ASFÁLTICAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE O *BALANCED MIX DESIGN* (BMD), O CONTROLE DE VARIABILIDADE E A TRANSIÇÃO NORMATIVA BRASILEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito final para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Flávio Renato de Góes Padula

BELO HORIZONTE

2026

Oliveira, Franciane Primo de
O48a Análise da incorporação de RAP em misturas asfálticas: uma revisão sistemática sobre o *Balanced Mix Design* (BMD), o controle de variabilidade e a transição normativa brasileira / Franciane Primo de Oliveira. – 2026.
76 f. : il., gráfs, tabs.

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de graduação do Programa de Graduação em Engenharia Civil.
Orientador: Flávio Renato de Góes Padula.
Bibliografia: f. 74-76.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Concreto asfáltico – Teses. 2. Materiais estruturais – Teses. 3. Pavimentos asfálticos – Reciclagem – Teses. 4. Construção sustentável – Teses. 5. Caracterização e avaliação de materiais – Teses. I. Padula, Flávio Renato de Góes. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 625.84

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Jane Marangon Duarte, CRB 6ª 1592 / Cefet/MG

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - NG

FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 16/2026 - DEC (11.56.07)

Nº do Protocolo: 23062.034583/2026-91

Belo Horizonte-MG, 03 de julho de 2026.

FRANCIANE PRIMO DE OLIVEIRA

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE RAP EM MISTURAS ASFÁLTICAS: uma revisão sistemática sobre o Balanced Mix Design (BMD)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Nova Gameleira, como parte do requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 19 de junho de 2026.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Flávio Renato de Góes Padula - Orientador
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Weber Guadagnin Moravia
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. MSc. Eduardo de Oliveira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

BELO HORIZONTE
2026

(Assinado digitalmente em 04/07/2026 10:34)
EDUARDO DE OLIVEIRA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEC (11.56.07)
Matrícula: ###215#8

(Assinado digitalmente em 06/07/2026 14:10)
FLAVIO RENATO DE GOES PADULA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEC (11.56.07)
Matrícula: ###536#9

(Assinado digitalmente em 03/07/2026 20:08)
WEBER GUADAGNIN MORAVIA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEC (11.56.07)
Matrícula: ###565#8

(Assinado digitalmente em 06/07/2026 11:07)
FRANCIANE PRIMO DE OLIVEIRA
DISCENTE
Matrícula: 2020######3

Visualize o documento original em https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp informando seu número: **16**, ano: **2026**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão: **03/07/2026** e o código de verificação: **bedf6d0186**

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Av. Amazonas, 7675 – Bairro Nova Gameleira – Belo Horizonte - MG
Departamento de Engenharia Civil - Prédio 12 - Telefone: (31) 3319-6810 – secretaria@civil.cefetmg.br

TERMO DE ACEITE FINAL - ORIENTADOR

Título do TCC:	
Análise da Incorporação de RAP Em Misturas Asfálticas: Uma Revisão Sistemática Sobre o *Balanced Mix Design* (BMD), o Controle De Variabilidade e a Transição Normativa Brasileira.	
Data defesa:	19 de Junho de 2026
Discente:	**Franciane Primo de Oliveira**
Orientador:	**Flávio Renato de Góes Padula**

Eu, **Franciane Primo de Oliveira** declaro que todas as sugestões de correção e melhoria indicadas pela banca de avaliação de meu Trabalho de Conclusão de Curso e acordadas com meu Prof. Orientador foram implementadas no texto e entregues ao mesmo, Prof(a). **Flávio Renato de Góes Padula** para validação final.

De acordo: Belo Horizonte, 29 de Junho de 2026 ,

Assinatura do Discente

Declaro ter recebido e conferido a versão final do texto e que as sugestões de correção e melhorias indicadas pela banca e acatadas por mim foram implementadas.

gov.br Documento assinado digitalmente
FLAVIO RENATO DE GOES PADULA
Data: 30/06/2026 10:40:38-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

De acordo: Belo Horizonte, 29 de Junho de 2026,

Assinatura do Orientador

Scanned with CamScanner

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE RAP EM MISTURAS ASFÁLTICAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE O *BALANCED MIX DESIGN* (BMD), O CONTROLE DE VARIABILIDADE E A TRANSIÇÃO NORMATIVA BRASILEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito final para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 19 de junho de 2026.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Flávio Renato de Góes Padula - Orientador

_____

Prof. Dr. Weber Moravia - CEFET-MG

_____

Prof. Me. Eduardo Oliveira - CEFET-MG

DEDICATÓRIA

À minha avó, Olerina *(in memoriam),* que nunca deixou de me dizer que seu sonho era me ver formada. Seu desejo tornou-se o meu, e foi isso que me sustentou em cada desafio.

À minha mãe, Maria Regina *(in memoriam)*, fonte de inspiração, perseverança e resiliência. O desejo de honrar sua memória é o que me impulsiona todos os dias.

Mães, eu consegui. E esta conquista é nossa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão a Deus, cuja minha força e fé me sustentaram ao longo de toda a minha trajetória acadêmica.

Ao meu companheiro, Rômulo, dirijo meu reconhecimento pelo apoio incondicional e pela presença constante nos momentos desafiadores da graduação. Sua parceria foi fundamental para que eu alcançasse mais esta etapa.

Minha sincera gratidão também se estende às minhas amigas íntimas, Gabriela, Júlia e Thaís, as quais sempre foram um porto seguro quando precisei e pelos momentos inesquecíveis que compartilhamos.

Aos meus professores que, com seu conhecimento compartilhado, contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional.

Agradeço também aos meus supervisores e colegas de trabalho, pela confiança depositada em mim e por criarem um ambiente de aprendizado tão rico e acolhedor.

Também sou profundamente grata ao meu orientador, professor Dr. Flávio Padula, por sua paciência, dedicação e orientação ao longo dessa jornada.

E por fim, agradeço ao CEFET-MG por fazer parte da minha vida há mais de uma década: inicialmente como Técnica em Edificações e agora como bacharel em Engenharia Civil. Sou grata por todo o conhecimento que adquiri e por esta instituição ter contribuído imensamente para o meu crescimento pessoal e profissional. Tenho muito carinho pela instituição.

EPÍGRAFE

"Os cientistas estudam o mundo como ele é;
os engenheiros criam o mundo que nunca existiu."

KÁRMÁN, Theodore von (1962).

RESUMO

A incorporação de elevados teores de Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP) em misturas asfálticas a quente representa uma alternativa promissora para a sustentabilidade da infraestrutura rodoviária, porém impõe desafios relacionados à variabilidade física do material e ao envelhecimento do ligante asfáltico. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar os desafios técnicos associados ao uso de altos teores de RAP e investigar as metodologias capazes de garantir o desempenho estrutural e a viabilidade ambiental dessas misturas. Para isso, foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura fundamentada no método *ProKnow-C*, abrangendo a seleção de um portfólio bibliográfico composto por 37 artigos científicos, seguida de análises bibliométrica e sistêmicas. Os resultados evidenciaram que a elevada variabilidade granulométrica do RAP exige a adoção de técnicas de fracionamento refinado para reduzir a heterogeneidade do material e estabilizar o esqueleto mineral da mistura. Verificou-se também que a interação entre o ligante envelhecido e o ligante virgem ocorre de forma parcial, tornando necessária a utilização controlada de agentes rejuvenescedores para restaurar as propriedades reológicas do ligante envelhecido. Além disso, constatou-se que métodos de dosagem fundamentados exclusivamente em parâmetros volumétricos apresentam limitações para prever o comportamento mecânico de misturas com elevados teores de RAP. Nesse cenário, no intuito de mitigar as limitações encontradas, a metodologia *Balanced Mix Design* (BMD) destaca-se como uma ferramenta capaz de equilibrar a resistência à deformação permanente e ao trincamento por meio da utilização de ensaios mecânicos de desempenho. Conclui-se que a integração entre o controle da variabilidade do RAP, o uso adequado de agentes rejuvenescedores e a adoção do BMD viabiliza a reciclagem segura em altas taxas, contribuindo para a implementação de pavimentos mais duráveis, economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis, em consonância com a evolução do dimensionamento mecanístico-empírico no Brasil (MeDiNa).

Palavras chave: *Balanced Mix Design*. BMD. Desempenho mecânico. Pavimento Asfáltico Reciclado. RAP. Sustentabilidade. Variabilidade.

ABSTRACT

The incorporation of high contents of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) into hot mix asphalt represents a promising alternative for enhancing the sustainability of road infrastructure. However, it poses challenges related to the physical variability of the material and the aging of the asphalt binder. In this context, this study aimed to analyze the technical challenges associated with the use of high RAP contents and to investigate methodologies capable of ensuring the structural performance and environmental feasibility of such mixtures. To achieve this objective, a Systematic Literature Review was conducted based on the ProKnow-C method, involving the selection of a bibliographic portfolio composed of 37 scientific articles, followed by bibliometric and systemic analyses. The results showed that the high gradation variability of RAP requires the adoption of refined fractionation techniques to reduce material heterogeneity and stabilize the mineral skeleton of the mixture. It was also found that the interaction between the aged binder and the virgin binder occurs only partially, making the controlled use of rejuvenating agents necessary to restore the rheological properties of the aged binder. Furthermore, mix design methods based exclusively on volumetric parameters were found to have limitations in predicting the mechanical behavior of mixtures containing high RAP contents. In this scenario, to mitigate these limitations, the Balanced Mix Design (BMD) methodology stands out as an effective approach for balancing resistance to permanent deformation and cracking through the use of mechanical performance tests. It can be concluded that the integration of RAP variability control, the proper use of rejuvenating agents, and the adoption of BMD enables safe high-rate recycling, contributing to the implementation of more durable, economically viable, and environmentally sustainable pavements, in line with the advancement of mechanistic-empirical pavement design in Brazil (MeDiNa).

Keywords: Balanced Mix Design. BMD. Material Variability. Mechanical Performance. Reclaimed Asphalt Pavement. RAP. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fatores externos e processos químicos que afetam o envelhecimento do ligante asfáltico..... 24
Figura 2.2 - Classificação das partículas de RAP em função do grau de aglomeração e presença de argamassa..... 25
Figura 2.3 - Parâmetros volumétricos e composição de massa de uma mistura asfáltica reciclada..... 26
Figura 2.4 - Componentes do ligante asfáltico residual em uma partícula de RAP: fases disponíveis e indisponíveis..... 31
Figura 2.5 - Representação esquemática das etapas laboratoriais de extração e recuperação do ligante asfáltico..... 32
Figura 2.6 - Representação no diagrama de *Black Space* das alterações reológicas geradas pelo envelhecimento e pelo rejuvenescimento do ligante..... 36
Figura 2.7 - Fluxograma das duas primeiras abordagens de dosagem da metodologia *Balanced Mix Design* segundo a AASHTO PP 105-20..... 40
Figura 2.8 - Fluxograma das duas últimas abordagens de dosagem da metodologia *Balanced Mix Design* segundo a AASHTO PP 105-20..... 41
Figura 2.9 - Diagrama de Espaço de Desempenho (PSD) bidimensional ilustrando a zona de aceitação para o balanceamento da mistura asfáltica..... 42
Figura 2.10 - Fluxograma metodológico da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) aplicado a pavimentos asfálticos reciclados, desde a produção dos materiais até a avaliação de impactos ambientais..... 48
Figura 3.1 - Fluxograma das etapas do processo de revisão sistemática de literatura segundo o método *ProKnow-C*..... 52
Figura 4.1 - Diferença entre as curvas granulométricas das partículas de RAP antes e após a extração do ligante..... 61
Figura 4.2 - Comparação do grau de aglomeração do RAP processado por britagem convencional (CCS) e por britagem refinada (RCS)..... 61
Figura 4.3 - Resultado do ensaio de *Flow Number* (FN) em função do teor de material fresado na mistura..... 63
Figura 4.4 - Simulação por dinâmica molecular do processo de difusão entre ligantes virgem e envelhecido ao longo do tempo..... 64
Figura 4.5 - Diagrama de interação do ensaio IDEAL-CT correlacionando a energia de fratura (Gf) e a inclinação pós-pico na determinação do Índice de Tolerância ao Trincamento (CTIndex)..... 65
Figura 4.6 - Comparativo das emissões de gases de efeito estufa (GHG) entre misturas asfálticas convencionais (0% RAP) e com incorporação de material fresado no cenário brasileiro..... 67
Figura 4.7 - Resultados do Potencial de Aquecimento Global (GWP) para a produção de misturas asfálticas contendo 30% e 70% de RAP..... 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Categorias, tipos e descrições dos principais agentes de reciclagem..... 35
Tabela 2.2 - Principais ensaios laboratoriais para avaliação da resistência à deformação permanente no escopo da metodologia BMD..... 44
Tabela 3.1 - Estratégias de busca utilizadas na pesquisa.....53
Tabela 3.2 - Síntese quantitativa do processo de seleção do portfólio bibliográfico..... 55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 - Distribuição temporal das publicações do portfólio bibliográfico (2016–2026).... 59
Gráfico 4.2 - Relevância dos periódicos no portfólio bibliográfico.....59

LISTA DE SIGLAS E ABREVIAÇÕES

3D PSD – *Three-Dimensional Performance Space Diagram* (Diagrama Tridimensional de Espaço de Desempenho)

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials* (Associação Americana de Autoridades Estaduais de Rodovias e Transportes)

APA – *Asphalt Pavement Analyzer* (Analisador de Pavimentos Asfálticos)

ASTM – *American Society for Testing and Materials* (Sociedade Americana de Testes e Materiais)

BMD – *Balanced Mix Design* (Projeto de Mistura Balanceada)

CCS – *Conventional Crushing and Screening* (Britagem e Peneiramento Convencionais)

CED – *Cumulative Energy Demand* (Demanda de Energia Cumulativa)

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CO_2-eq – *Carbon Dioxide Equivalent* (Equivalente de Dióxido de Carbono)

CT – *Computed Tomography* (Tomografia Computadorizada por Raios X)

CT Index – *Cracking Tolerance Index* (Índice de Tolerância ao Trincamento)

CV – *Coefficient of Variation* (Coeficiente de Variação)

DCM – *Dichloromethane* (Diclorometano)

DCT – *Disk-Shaped Compact Tension* (Ensaio de Tração Compacta em Disco)

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DoAv – *Degree of Binder Availability* (Grau de Disponibilidade do Ligante Asfáltico)

DoB – *Degree of Blending* (Grau de Mistura entre Ligantes)

DSR – *Dynamic Shear Rheometer* (Reômetro de Cisalhamento Dinâmico)

FI – *Flexibility Index* (Índice de Flexibilidade)

FN – *Flow Number* (Número de Fluência)

GHG – *Greenhouse Gases* (Gases de Efeito Estufa)

HWTT – *Hamburg Wheel Tracking Test* (Ensaio de Afundamento por Roda de Hamburgo)

IDEAL-CT – *Indirect Tensile Asphalt Cracking Test* (Ensaio de Trincamento por Tração Indireta em Misturas Asfálticas)

I-FIT – *Illinois Flexibility Index Test* (Ensaio do Índice de Flexibilidade de Illinois)

LCA – *Life Cycle Assessment* (Avaliação do Ciclo de Vida)

MeDiNa – Método Mecanístico-Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos

OAC – *Optimum Asphalt Content* (Teor Ótimo de Ligante)

***ProKnow*-C** – *Knowledge Development Process – Constructivist* (Processo Construtivista de Desenvolvimento do Conhecimento)

PSD – *Performance Space Diagram* (Diagrama de Espaço de Desempenho)

RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement* (Pavimento Asfáltico Reciclado)

RCS – *Refined Crushing and Screening* (Britagem e Peneiramento Refinados)

RT / RTCD – Resistência à Tração por Compressão Diametral

SCB – *Semi-Circular Bending* (Flexão Semicircular)

TCE – *Trichloroethylene* (Tricloroetileno)

VFA – *Voids Filled with Asphalt* (Vazios Preenchidos por Asfalto)

VMA – *Voids in the Mineral Aggregate* (Volume de Vazios no Agregado Mineral)

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

GWP – *Global Warming Potential* (Potencial de Aquecimento Global)

LabMCDA – Laboratório de Metodologias Multicritério em Apoio à Decisão

LCC – *Life Cycle Cost* (Análise do Custo do Ciclo de Vida)

MD – *Molecular Dynamics* (Dinâmica Molecular)

SciELO – *Scientific Electronic Library Online*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....16
1.1. Pergunta de pesquisa.....18
1.2. Objetivos.....18
1.2.1. Objetivos gerais.....18
1.2.2. Objetivos específicos.....19
1.3. Justificativa e relevância.....19
1.4. Restrições e limitações da pesquisa.....20
1.5. Estrutura do trabalho.....21
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....22
2.1. O Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP) e o envelhecimento do ligante.....22
2.1.1. Mecanismos de envelhecimento e reologia do betume residual.....23
2.1.2. Impactos do alto teor de RAP no desempenho mecânico.....24
2.2. Variabilidade física do RAP: aglomeração e processamento industrial.....25
2.2.1. O fenômeno de aglomeração (*clustering*) e falsas partículas.....25
2.2.2. Impactos volumétricos na mistura final.....26
2.2.3. Fracionamento granulométrico e classificação em usina.....27
2.3. Interação química entre ligantes e fenômenos de *Blending*.....28
2.3.1. Teorias de mistura dos asfaltos (*blending*).....29
2.3.2. Grau de disponibilidade (DoAv) e grau de mistura (DoB).....30
2.3.3. Desafios laboratoriais na extração e recuperação do ligante.....31
2.4. Modificação química: a ação de agentes rejuvenescedores.....33
2.4.1. Tipos e mecanismos de rejuvenescimento.....34
2.4.2. Efeitos no desempenho mecânico de longo prazo.....35
2.5. Evolução dos métodos de dosagem e a metodologia *Balanced Mix Design* (BMD)...37
2.5.1. Limitações do método Marshall e do Superpave volumétrico.....38
2.5.2. A metodologia *Balanced Mix Design* (BMD).....39
2.5.3. Uso de Diagramas de Espaço de Desempenho (PSD).....43
2.6. Ensaios mecânicos de desempenho no contexto do BMD.....44
2.6.1. Avaliação da resistência à deformação permanente (*rutting*).....45
2.6.2. Avaliação da resistência ao trincamento (*cracking*).....46
2.7. A Realidade normativa brasileira e a sustentabilidade.....47
2.7.1. A transição para o método MeDiNa e a inserção do BMD.....47
2.7.2. Avaliação de Desempenho Ambiental (LCA) e economia circular.....49
3. METODOLOGIA.....51
3.1. Enquadramento metodológico.....51

3.2. O método *ProKnow-C*.....52
3.3. Definições da pesquisa e estratégia de busca.....53
3.4. Critérios de elegibilidade e seleção do portfólio bibliográfico.....55
3.5. Análise bibliométrica.....57
3.6. Análise sistêmica da literatura.....57
4. ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS.....59
4.1. Resultados da análise bibliométrica.....59
4.2. Impacto da variabilidade física e a eficiência do fracionamento refinado.....61
4.3. O paradoxo do envelhecimento: ganho de estabilidade vs. suscetibilidade ao trincamento.....63
4.4. Desafios químicos: a dinâmica de *Blending* e a ação dos rejuvenescedores.....64
4.5. A metodologia BMD como ferramenta de equilíbrio mecânico.....66
4.6. Sustentabilidade da incorporação de elevados teores de RAP.....68
4.7. Perspectivas para a implementação do BMD e integração com o MeDiNa no Brasil.70
5. CONCLUSÕES.....73
5.1. Sugestões para trabalhos futuros.....74
6. REFERÊNCIAS.....76

1. INTRODUÇÃO

A manutenção constante da infraestrutura rodoviária gera grandes volumes de material fresado, conhecido na literatura técnica como Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP - *Reclaimed Asphalt Pavement*). A reciclagem desse material para a produção de novas misturas asfálticas a quente consolidou-se como uma prática importante para a engenharia civil sustentável. Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) demonstram que o uso de RAP reduz significativamente a demanda por energia térmica nas usinas e diminui as emissões de gases de efeito estufa (MASCARENHAS *et al*., 2023; SANTOLINI *et al*., 2024). Além disso, essa tecnologia contribui para preservar jazidas de agregados naturais não renováveis e reduzir o acúmulo de resíduos sólidos em aterros ambientais (ANTUNES *et al*., 2019).

Apesar dos benefícios ambientais, a utilização de altos teores de RAP, geralmente acima de 25%, ainda apresenta desafios técnicos relevantes para o projeto da mistura. Durante a vida útil do pavimento, o ligante asfáltico sofre oxidação e perda de frações leves por volatilização. Esse processo altera a composição química do betume e aumenta sua rigidez (LIN *et al*., 2024; FERREIRA *et al.*, 2021). Como consequência, a mistura asfáltica reciclada torna-se mais suscetível ao trincamento, que inclui o trincamento por fadiga causado pela repetição das cargas do tráfego e a fissuração térmica em baixas temperaturas.

Para reduzir o risco de falhas prematuras, é necessário compreender a interação física e química entre o ligante envelhecido e o ligante virgem adicionado na usina. Em projetos mais antigos, a engenharia adotava premissas extremas para representar essa interação. A primeira era o conceito de *Black Rock*, que considerava o RAP como um agregado inerte, assumindo 0% de interação do ligante envelhecido. A segunda assumia uma mistura homogênea total entre os ligantes. Estudos recentes demonstram que essa interação ocorre apenas de forma parcial na prática (OREŠKOVIĆ *et al*., 2020; ZHANG *et al*., 2024).

Nesse contexto, a literatura técnica utiliza duas métricas principais. O Grau de Disponibilidade (DoAv - *Degree of Binder Availability*) representa a parcela do ligante envelhecido ativada termicamente no tambor da usina. Já o Grau de Mistura (DoB - *Degree of Blending*, ou) quantifica o nível efetivo de homogeneização entre os ligantes. Assumir incorretamente 100% de mistura pode gerar deficiência de ligante efetivo, formando pavimentos secos e mais suscetíveis ao trincamento. Em contrapartida, subestimar essa

interação pode levar ao uso excessivo de ligante virgem, aumentando o risco de exsudação e deformação plástica da mistura (GASPAR *et al.*, 2020). Para melhorar a mobilidade do ligante envelhecido e recuperar parte das frações leves perdidas, o uso de agentes rejuvenescedores tornou-se uma alternativa frequente em misturas recicladas (KASEER *et al*., 2019).

Além das características do ligante, a variabilidade física do agregado fresado também interfere diretamente no controle de qualidade da produção. O processo de fresagem e o armazenamento prolongado favorecem a formação de *clusters*, que são aglomerações de partículas finas aderidas pela película de asfalto envelhecido (DUARTE *et al*., 2026; AI *et al*., 2025). Esses aglomerados comportam-se como falsas partículas graúdas. Quando se rompem de forma irregular durante a usinagem, alteram a curva granulométrica prevista no projeto.

Essa variação compromete o Volume de Vazios no Agregado Mineral (VMA), parâmetro responsável por representar o espaço vazio entre os agregados necessário para acomodar o volume adequado de ligante. Como consequência, a mistura pode perder estabilidade e desempenho mecânico. Para reduzir essa variabilidade, muitas usinas utilizam o fracionamento do RAP. O processo consiste na separação mecânica do material em diferentes faixas granulométricas por peneiramento. Esse procedimento reduz a presença de *clusters*, melhora a uniformidade granulométrica e permite a utilização de maiores porcentagens de RAP com maior segurança operacional (XU *et al*., 2025; OREŠKOVIĆ *et al*., 2020).

Além dos desafios físicos, químicos e mecânicos associados ao aumento do teor de RAP, a ampliação da reciclagem em altas taxas também depende da capacidade dos métodos de dosagem de representar adequadamente o comportamento dessas misturas. Nesse contexto, o cenário brasileiro ainda apresenta limitações importantes, uma vez que os procedimentos tradicionalmente utilizados foram desenvolvidos para misturas convencionais e não contemplam, de forma direta, os efeitos da variabilidade do RAP e do envelhecimento do ligante asfáltico.

No Brasil, o método de dosagem Marshall, estabelecido por especificações do DNIT, como a norma DNIT 031/2006-ES, ainda predomina na maior parte das obras rodoviárias. Esse método avalia principalmente parâmetros volumétricos e a estabilidade empírica dos corpos de prova (CENTOFANTE *et al*., 2018). No entanto, o procedimento apresenta limitações para prever o comportamento mecânico de misturas recicladas, especialmente em materiais com ligantes envelhecidos (MONTEIRO *et al.*, 2023).

Para superar essa limitação, órgãos internacionais consolidaram a metodologia *Balanced Mix Design* (BMD). O método define o teor ótimo de ligante por meio do equilíbrio entre resistência ao trincamento e a deformação permanente, que corresponde à deformação permanente ou afundamento na trilha de roda. Essa avaliação ocorre por meio de ensaios laboratoriais de desempenho. Com a adoção progressiva do método mecanístico-empírico MeDiNa no Brasil, o domínio prático do BMD e o controle da variabilidade do RAP tornam-se fundamentais para a modernização da infraestrutura rodoviária nacional.

1.1. Pergunta de pesquisa

Atualmente, o método de dosagem volumétrica Marshall é o mais utilizado no Brasil, sendo estabelecido por normativas vigentes, como a DNIT 031/2006-ES. Entretanto, esse método apresenta limitações na previsão do desempenho mecânico de misturas asfálticas com elevados teores de RAP (MONTEIRO *et al.*, 2023; CENTOFANTE *et al.*, 2018). Considerando essa limitação técnica, a presente revisão sistemática orienta-se pela seguinte questão central:

De que forma a adoção dos critérios de desempenho do método BMD, pode viabilizar a incorporação segura de elevados teores de RAP em misturas asfálticas, superando as limitações do método Marshall e contribuindo para a transição ao dimensionamento mecanístico-empírico representado pelo método MeDiNa no Brasil?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos gerais

Analisar e sistematizar as evidências científicas sobre a eficácia da metodologia BMD e do controle da variabilidade física na mitigação dos impactos mecânicos gerados por altos teores de RAP. Busca-se compreender como o estado da arte internacional soluciona as limitações dos métodos volumétricos tradicionais, relacionando esses avanços ao contexto da transição normativa brasileira.

1.2.2. Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral proposto e garantir a viabilidade da pesquisa por meio da revisão sistemática da literatura, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

- Mapear os principais ensaios mecânicos de desempenho, com foco na avaliação da deformação permanente e do trincamento por fadiga, adotados predominantemente pelos protocolos internacionais do método BMD.
- Identificar, a partir da literatura recente, os desafios analíticos dos métodos de extração e recuperação do ligante residual, bem como as variáveis que governam o fenômeno de mistura parcial durante a usinagem.
- Sistematizar os impactos da variabilidade granulométrica e da aglomeração de partículas no comportamento da mistura, avaliando as soluções mitigadoras relatadas na literatura, como o fracionamento do fresado e a modificação química por agentes rejuvenescedores.
- Comparar os parâmetros metodológicos baseados em desempenho (BMD) com as práticas estritamente volumétricas atualmente utilizadas no Brasil, evidenciando lacunas de conhecimento e oportunidades para futuras investigações laboratoriais no contexto do método MeDiNa.

1.3. Justificativa e relevância

A pavimentação rodoviária global caminha para a adoção de práticas alinhadas aos princípios da economia circular. Nesse contexto, a presente pesquisa justifica-se pela necessidade de compreender os fatores que restringem a incorporação de RAP nas rodovias nacionais a teores conservadores, geralmente inferiores a 25% (MONTEIRO *et al.,* 2023).

Essa limitação não decorre da inviabilidade técnica do material reciclado, mas, em grande parte, das restrições associadas ao método de dosagem tradicionalmente adotado no país. O método Marshall, baseia-se predominantemente em parâmetros volumétricos e não avalia diretamente o comportamento mecânico do ligante envelhecido sob solicitações dinâmicas, o que dificulta a previsão do desempenho estrutural das misturas recicladas (CENTOFANTE *et al*., 2018; FERREIRA *et al.*, 2021). Como consequência, a utilização de elevados teores de RAP ainda ocorre de forma limitada, devido à incerteza quanto à durabilidade e ao comportamento mecânico do pavimento em serviço.

A relevância teórica e prática desta revisão sistemática consiste em analisar o método BMD e as técnicas de fracionamento do RAP como alternativas capazes de contribuir para a superação dessas limitações técnicas e normativas. A abordagem do BMD fundamenta-se em

ensaios laboratoriais voltados à avaliação direta da resistência da mistura ao trincamento por fadiga e à deformação permanente, reduzindo a dependência exclusiva de parâmetros volumétricos na dosagem (método Marshall) das misturas asfálticas (LI *et al.,* 2023; XU *et al.,* 2025).

Além da atualização metodológica, o estudo apresenta relevância ambiental e econômica. A viabilização de misturas asfálticas contendo elevados teores de RAP pode reduzir significativamente os custos associados às obras de manutenção rodoviária, além de minimizar a extração de agregados minerais, o consumo energético das usinas e as emissões de gases de efeito estufa relacionadas à produção da mistura asfáltica (MASCARENHAS *et al.,* 2023; SANTOLINI *et al.*, 2024; ANTUNES *et al.*, 2019).

Por fim, esta pesquisa também se justifica pelo alinhamento com o atual processo de modernização dos métodos de dimensionamento de pavimentos no Brasil. Com a adoção do método mecanístico-empírico MeDiNa, torna-se cada vez mais necessária a utilização de parâmetros associados ao desempenho mecânico das misturas asfálticas, especialmente em relação à resistência à fadiga e à deformação permanente (MONTEIRO *et al.,* 2023). Nesse sentido, ao reunir e discutir o estado da arte sobre o comportamento mecânico de misturas contendo RAP, este trabalho busca contribuir para a ampliação do conhecimento técnico necessário à integração segura de materiais reciclados à realidade contemporânea da pavimentação brasileira.

1.4. Restrições e limitações da pesquisa

A adoção da revisão sistemática da literatura como estratégia de pesquisa resultou da necessidade de readequação do estudo inicialmente proposto. Em sua concepção original, o trabalho previa a análise de dados operacionais e experimentais de uma miniusina de RAP que utilizava 100% de material fresado em serviços de manutenção rodoviária, operada por uma empresa do setor de infraestrutura de transportes. No entanto, devido a restrições relacionadas à confidencialidade industrial e à indisponibilidade dos dados para divulgação acadêmica, a pesquisa foi reformulada. Dessa forma, optou-se pela condução de uma revisão sistemática da literatura com apoio computacional, possibilitando uma análise estruturada e criteriosa das evidências científicas disponíveis sobre o tema.

Segundo Azevedo e Ensslin (2020), esse método de revisão sistemática restringe a obtenção de dados ao conjunto de documentos publicados e indexados nas bases de dados

definidas previamente no protocolo de pesquisa. Assim, o trabalho não contempla a realização de ensaios laboratoriais, moldagem de corpos de prova ou coleta direta de amostras de RAP em campo para validação experimental. As análises desenvolvidas baseiam-se exclusivamente nas evidências técnicas e científicas identificadas no portfólio bibliográfico e nas normas técnicas selecionadas para o estudo.

Uma possível limitação está relacionada à compatibilidade entre os métodos internacionais analisados e a realidade da infraestrutura laboratorial brasileira. A implementação de ensaios de desempenho associados ao método BMD, como simuladores de trilha de roda e ensaios de módulo dinâmico, requer equipamentos de alto custo e maior complexidade operacional (MONTEIRO *et al.*, 2023). Nesse contexto, a disponibilidade restrita dessa aparelhagem em parte dos laboratórios e usinas nacionais pode dificultar a aplicação imediata das diretrizes discutidas pela literatura internacional na rotina de controle tecnológico brasileira.

1.5. Estrutura do trabalho

A organização textual deste trabalho segue as recomendações para pesquisas em engenharia estabelecidas por Azevedo e Ensslin (2020), estruturando-se de forma lógica em cinco capítulos. O capítulo 1 apresenta a contextualização do tema, a pergunta de pesquisa, os objetivos, a justificativa e relevância, bem como as restrições e limitações da pesquisa. O capítulo 2 expõe o referencial teórico, abordando os mecanismos associados ao envelhecimento dos ligantes asfálticos, a variabilidade do RAP e os fundamentos mecânicos do método *Balanced Mix Design*. O capítulo 3 descreve os procedimentos metodológicos da Revisão Sistemática da Literatura adotada para seleção, filtragem e validação do portfólio bibliográfico. O capítulo 4 apresenta a análise e discussão dos resultados, incluindo a comparação entre o método volumétrico tradicional utilizado no Brasil e os critérios de desempenho adotados internacionalmente. O capítulo 5 sintetiza as conclusões da pesquisa e apresenta recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O uso de elevadas taxas de RAP em misturas asfálticas envolve desafios relacionados às características do próprio material fresado. O envelhecimento do ligante residual, a variabilidade de suas propriedades e as dificuldades associadas à incorporação desse material influenciam diretamente o comportamento da mistura e seu desempenho em serviço. Além disso, tais características impõem limitações aos métodos tradicionais de dosagem e demandam abordagens capazes de representar de forma mais adequada às condições reais de operação dos pavimentos.

Nesse contexto, torna-se necessário compreender os fatores que condicionam o aproveitamento do RAP e as metodologias empregadas para avaliar seu desempenho. Assim, este capítulo apresenta os principais aspectos teóricos relacionados ao material fresado e aos métodos utilizados para sua aplicação em misturas asfálticas.

2.1. O Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP) e o envelhecimento do ligante

O RAP é o material obtido pela fresagem ou remoção de camadas de pavimentos asfálticos deteriorados durante atividades de manutenção e reabilitação viária. Quando adequadamente processado, esse material torna-se um insumo de elevado valor agregado, composto por agregados minerais de boa qualidade revestidos por uma película de ligante asfáltico envelhecido (ANTUNES *et al*., 2019; XING *et al*., 2023). A utilização do RAP na produção de novas misturas asfálticas é amplamente reconhecida pelos benefícios econômicos e ambientais que proporciona. Seu emprego reduz a necessidade de extração de agregados e ligantes virgens, diminui o volume de resíduos destinados a aterros e contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa associadas à infraestrutura de transportes (SANTOLINI *et al*., 2024; MASCARENHAS *et al*., 2023).

Apesar dessas vantagens, a incorporação de elevados teores de RAP, normalmente superiores a 25%, ainda representa um desafio para o projeto de misturas asfálticas. A principal dificuldade está relacionada ao estado do ligante residual presente no material fresado. Após anos de exposição às condições ambientais e às solicitações do tráfego, esse ligante apresenta maior rigidez e menor capacidade de deformação. Como consequência, as misturas recicladas tendem a se tornar mais rígidas e suscetíveis ao trincamento por fadiga e

ao trincamento térmico, além de apresentarem maiores dificuldades de trabalhabilidade e compactação em campo (KASEER *et al*., 2019; YU *et al*., 2024).

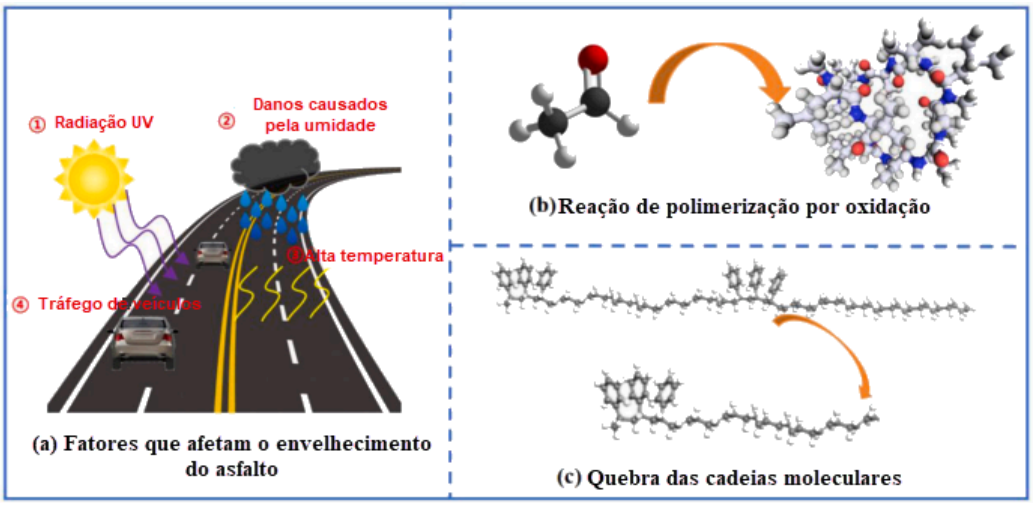
Dessa forma, o desempenho de misturas com RAP está diretamente relacionado às alterações sofridas pelo ligante ao longo de sua vida útil. Compreender os mecanismos responsáveis por esse processo é fundamental para avaliar o comportamento do material reciclado e definir estratégias adequadas para sua utilização. Por isso, a seção seguinte aborda as principais transformações químicas e reológicas associadas ao envelhecimento do ligante.

2.1.1. Mecanismos de envelhecimento e reologia do betume residual

O ligante asfáltico pode ser representado por um modelo coloidal formado por duas frações principais: os asfaltenos, que constituem a fase insolúvel, e os maltenos, compostos por óleos saturados, aromáticos e resinas (KASEER *et al*., 2019). Ao longo da vida útil do pavimento, esse material passa por um processo contínuo de envelhecimento que altera de forma permanente suas propriedades físicas e químicas. Esse fenômeno ocorre em duas etapas principais. A primeira corresponde ao envelhecimento de curto prazo, associado às elevadas temperaturas de usinagem e aplicação, que favorecem a oxidação inicial e a perda de componentes leves por volatilização. A segunda refere-se ao envelhecimento de longo prazo, decorrente da exposição contínua ao oxigênio, à radiação ultravioleta e às variações de temperatura durante o período de serviço do pavimento (YU *et al.*, 2024).

Do ponto de vista químico, o envelhecimento oxidativo modifica o equilíbrio entre as frações que compõem o betume. Durante a exposição aos agentes ambientais, as ligações insaturadas presentes nos compostos aromáticos reagem com o oxigênio e dão origem a substâncias mais polares, como cetonas, aldeídos, ésteres e ácidos carboxílicos (WANG *et al*., 2024; ZHONG *et al.*, 2023). Paralelamente, parte dos óleos mais leves volatiliza ou é gradualmente convertida em resinas e, posteriormente, em asfaltenos por meio de reações de polimerização (WANG *et al*., 2024), conforme ilustrado na figura 2.1. Como resultado, o ligante residual presente no RAP passa a apresentar maior concentração de asfaltenos e redução significativa da fração de maltenos (KASEER *et al.*, 2019).

Figura 2.1 - Fatores externos e processos químicos que afetam o envelhecimento do ligante asfáltico.



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

As mudanças na composição química refletem diretamente no comportamento reológico do ligante. O aumento da concentração de asfaltenos e o acúmulo de compostos oxidados elevam a rigidez do betume e aumentam sua tendência à fragilização (YU *et al*., 2024). Como consequência, o material perde parte de sua ductilidade e reduz sua capacidade de dissipar tensões sem ocorrência de fratura (KASEER *et al*., 2019). Assim, a película de asfalto envelhecido que recobre os agregados do RAP passa a exercer influência significativa sobre o desempenho das novas misturas asfálticas, exigindo cuidados específicos durante o processo de dosagem para minimizar os efeitos das propriedades adquiridas ao longo do envelhecimento.

2.1.2. Impactos do alto teor de RAP no desempenho mecânico

Em temperaturas elevadas, o aumento da rigidez tende a favorecer o desempenho da mistura asfáltica. O ligante oxidado presente no RAP apresenta elevada viscosidade, o que reduz a movimentação dos agregados sob a ação das cargas e aumenta a resistência à deformação permanente, conhecida como *rutting* ou afundamento de trilha de roda (YU *et al.*, 2024). Como evidência desse comportamento, a literatura mostra que o número de ciclos suportados pela mistura antes do surgimento de deformações plásticas, frequentemente avaliado por ensaios como o *Flow Number* (FN), aumenta à medida que cresce a incorporação de material fresado (CENTOFANTE *et al.*, 2018).

Por outro lado, essa mesma rigidez excessiva pode prejudicar o desempenho da mistura em relação ao trincamento. Com o envelhecimento, o ligante perde parte da sua

capacidade de deformação e de dissipação de tensões, tornando a matriz asfáltica mais frágil e suscetível ao aparecimento de fissuras (ANTUNES *et al.*, 2019).

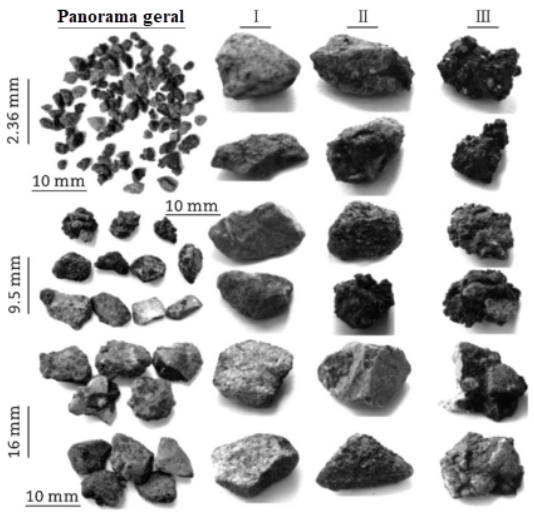
2.2. Variabilidade física do RAP: aglomeração e processamento industrial

A variabilidade física do RAP constitui uma das principais barreiras técnicas para a incorporação de altas taxas de material em novas misturas asfálticas. Essa variabilidade tem origem nas diferenças dos materiais das rodovias antigas e agrava-se de acordo com o método de fresagem, transporte e estocagem. Tais fatores afetam diretamente as características geométricas e a granulometria do material antes mesmo de qualquer interação química ocorrer durante a usinagem (ZHANG *et al*., 2024). Consequentemente, o controle rigoroso da fração sólida do material torna-se um requisito obrigatório no processo de reciclagem.

2.2.1. O fenômeno de aglomeração (*clustering*) e falsas partículas

Durante a fresagem do pavimento e o armazenamento do RAP, a ação mecânica combinada à presença do ligante asfáltico envelhecido favorece a união entre as partículas do material reciclado. Esse processo origina o fenômeno de aglomeração (*clustering*), que pode ocorrer principalmente de duas formas: pela união de partículas finas entre si ou pela aderência dessas partículas à superfície de agregados maiores (AI *et al.*, 2025). Para compreender melhor a heterogeneidade do RAP, a literatura classifica suas partículas em três categorias (AI *et al*., 2025), conforme a figura 2.2.

Figura 2.2 - Classificação das partículas de RAP em função do grau de aglomeração e presença de argamassa.



Fonte: Adaptado de AI *et al*., 2025.

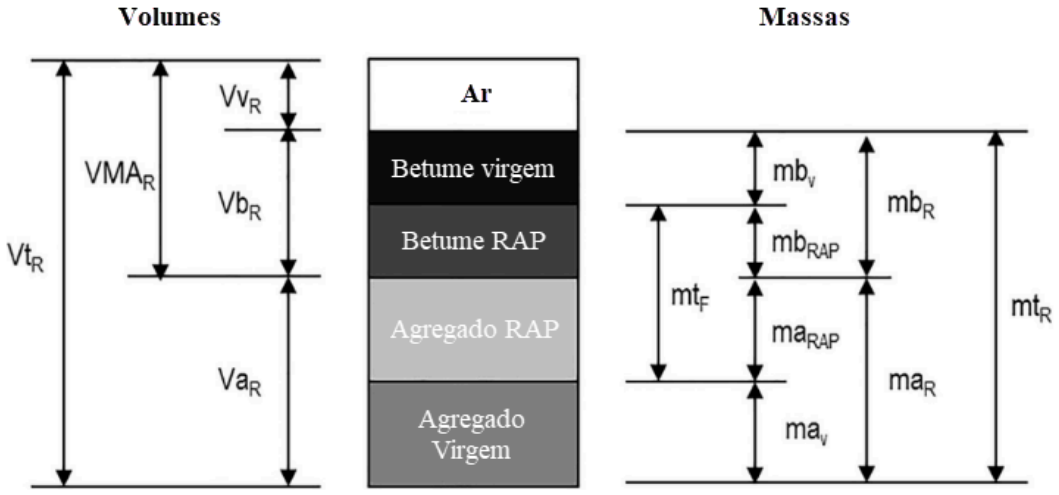
As partículas da Classe I correspondem a agregados individuais limpos. As da Classe II apresentam finos parcialmente aderidos à sua superfície. Já as partículas da Classe III são compostas integralmente por aglomerados de argamassa e finos fortemente unidos. Essas últimas, exigem atenção especial, pois se comportam como falsas partículas graúdas durante o processamento em usina.

A presença dessas falsas partículas gera uma "pseudo-granulometria", produzindo diferenças significativas entre a curva granulométrica do RAP em sua condição original, e a granulometria real obtida após a extração do ligante. Compreender essas classes é fundamental, pois a desconsideração das falsas partículas pode comprometer o empacotamento do esqueleto mineral durante a dosagem da mistura asfáltica.

2.2.2. Impactos volumétricos na mistura final

A presença de *clusters* de RAP não dispersos altera diretamente a estrutura da nova mistura asfáltica. Durante a usinagem, o tempo de mistura e a temperatura nem sempre são suficientes para romper completamente a película de asfalto envelhecido que mantém as partículas unidas. Nessas condições, os aglomerados passam a se comportar como agregados graúdos, fazendo com que a granulometria efetiva da mistura seja mais grossa do que a prevista em projeto (AI *et al*., 2025), alterando as proporções de massa e volume da mistura, como esquematizado na figura 2.3.

Figura 2.3 - Parâmetros volumétricos e composição de massa de uma mistura asfáltica reciclada.



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

Onde:

VvR – volume de vazios de ar da mistura reciclada
VbR – volume de ligante da mistura reciclada
VaR – volume de agregados da mistura reciclada
VtR – volume total da mistura reciclada
VMAR – volume de Vazios no Agregado Mineral da mistura reciclada
mtR – massa total da mistura reciclada
mtRAP – massa total de RAP
maR – massa total de agregados da mistura reciclada
maRAP – massa de agregados do RAP
mav – massa de agregados virgens
mbR – massa total de ligante da mistura reciclada
mbRAP – massa de ligante do RAP
mbv – massa de ligante virgem

Essa diferença entre a granulometria projetada e a granulometria real compromete o empacotamento do esqueleto mineral. Estudos mostram que misturas recicladas com elevada presença de *clusters* não dispersos tendem a apresentar aumento do Volume de Vazios no Agregado Mineral (VMA) e do teor de vazios de ar em comparação com misturas de granulometria mais uniforme (AI *et al.*, 2025). Como resultado, a acomodação das partículas torna-se menos eficiente, dificultando a densificação da mistura e reduzindo os Vazios Preenchidos por Asfalto (VFA) (KATLA *et al.*, 2022).

Essas alterações nos parâmetros volumétricos afetam a trabalhabilidade da mistura e dificultam a obtenção da densidade de projeto durante a compactação em campo (AI *et al.*, 2025). Além disso, a heterogeneidade causada pela variabilidade dos aglomerados pode comprometer a estabilidade mecânica do revestimento e gerar inconsistências em relação aos critérios normativos de aceitação do material (ANTUNES *et al.*, 2019). Por esse motivo, o controle e a redução da variabilidade física associada aos *clusters* são etapas fundamentais para garantir o desempenho e a durabilidade de misturas com altos teores de RAP.

2.2.3. Fracionamento granulométrico e classificação em usina

Para reduzir a heterogeneidade causada pelos *clusters* e aumentar a estabilidade volumétrica da mistura asfáltica, o processamento mecânico do RAP constitui uma etapa fundamental de controle. O armazenamento do material fresado em pilhas não classificadas compostas por materiais de diferentes origens e sem separação granulométrica, pode gerar variações significativas tanto no teor de ligante quanto na distribuição da curva granulométrica (BARRAJ; ELKORDI, 2022).

O fracionamento convencional consiste na separação do RAP por meio de peneiras industriais, formando estoques distintos conforme o tamanho das partículas. Em sua configuração mais simples, o material é dividido em duas frações utilizando a peneira de 4,75 mm como referência. Entretanto, sistemas com três, quatro ou até seis frações têm sido adotados para reduzir o Coeficiente de Variação (CV) da granulometria e do teor de ligante residual (*KATLA et al.*, 2022; *ZHANG et al.*, 2025). O fracionamento em quatro níveis, por exemplo, contribui para melhorar o empacotamento das partículas e reduzir a suscetibilidade da mistura à umidade (*XU et al.*, 2025; *ZHANG et al.*, 2025).

Apesar de promover a padronização do tamanho do material fresado, o sistema convencional de britagem e peneiramento (*Conventional Crushing and Screening* – CCS) atua principalmente na classificação granulométrica. Como consequência, aglomerados fortemente aderidos podem permanecer intactos mesmo após o peneiramento. Para superar essa limitação, foi desenvolvida a tecnologia de Britagem e Peneiramento Refinados (*Refined Crushing and Screening* – RCS), também denominada separação fina (LI *et al.*, 2024; QU *et al.*, 2024).

Esse processo utiliza britadores de impacto centrífugo, que lançam as partículas em alta velocidade para promover colisões e intenso atrito entre os agregados (QU *et al.*, 2024). A ação mecânica ocorre diretamente na interface entre o ligante envelhecido e o agregado mineral, favorecendo a ruptura dos *clusters* e a separação da argamassa asfáltica aderida. Como resultado, as frações graúdas tornam-se mais limpas, enquanto o asfalto envelhecido passa a se concentrar na fração fina do material (LI *et al.*, 2024).

2.3. Interação química entre ligantes e fenômenos de *Blending*

Após o controle das propriedades físicas e granulométricas do material fresado, o desempenho da mistura asfáltica reciclada passa a depender da interação entre seus constituintes. Diferentemente das misturas convencionais, a incorporação de RAP exige que o ligante virgem não apenas recobra os agregados, mas também interaja com a película de asfalto envelhecido presente no material reciclado. Compreender esse processo é fundamental para prever o comportamento da mistura em serviço, uma vez que o grau de homogeneização entre os ligantes influencia diretamente a coesão da matriz e sua resistência aos esforços de tração e cisalhamento.

2.3.1. Teorias de mistura dos asfaltos (*blending*)

A mobilização e a interação entre o ligante asfáltico residual e o ligante virgem não ocorrem de forma instantânea. Esse processo é controlado por mecanismos físicos e químicos de transferência de massa. Para explicar como essa mistura acontece durante a usinagem de misturas asfálticas recicladas, a literatura destaca três principais abordagens teóricas: as leis de difusão de Fick, a teoria da transferência de massa convectiva e a simulação por dinâmica molecular (MD) (XING *et al*., 2023; ZHANG *et al.*, 2024).

A primeira abordagem é baseada nas leis de difusão de Fick. Nesse modelo, a mistura entre dois asfaltos é tratada como um processo de difusão em estado não estacionário, no qual as moléculas se deslocam em função de diferenças de concentração (XING *et al*., 2023). O ligante envelhecido presente no RAP, que perdeu parte de suas frações leves, apresenta concentração diferente da observada no ligante virgem ou no agente rejuvenescedor. Essa diferença atua como força motriz para o processo de difusão. Apesar de fornecer uma base matemática consolidada, o modelo apresenta limitações por assumir uma difusão ideal e homogênea. Essa condição não representa completamente a realidade do RAP, já que a espessura do filme asfáltico ao redor dos agregados é irregular e o sistema envolve múltiplos componentes com diferentes taxas de difusão (ZHANG *et al*., 2024).

Com o objetivo de superar parte dessas limitações, utiliza-se a teoria da transferência de massa convectiva. Nessa abordagem, considera-se que a mistura na usina não ocorre apenas por difusão molecular, mas também pela ação da energia mecânica e da intensa movimentação promovida pelos equipamentos, fenômeno conhecido como difusão por vórtice (ZHANG *et al.*, 2024). Embora represente de forma mais realista as condições de usinagem, a determinação precisa dos coeficientes convectivos é complexa. Isso ocorre porque esses parâmetros dependem de diversos fatores, como a viscosidade dos ligantes e as propriedades do fluido em movimento, o que limita sua aplicação em modelagens mais precisas (XING *et al*., 2023; ZHANG *et al.*, 2024).

A abordagem mais avançada para o estudo do fenômeno de *blending* é a simulação por dinâmica molecular (MD). Como os métodos experimentais tradicionais apresentam dificuldades para observar diretamente a interface entre os ligantes em escala nanométrica, os modelos computacionais passaram a ser amplamente utilizados (XING *et al*., 2023). De

acordo com essas simulações, a mistura entre o asfalto novo e o envelhecido ocorre em duas etapas termodinâmicas principais: a fase de contato e a fase de difusão (ZHANG *et al*., 2024).

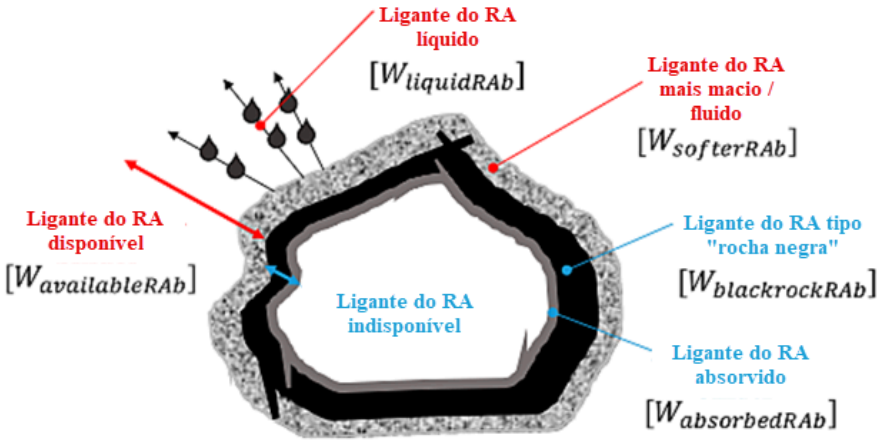
Na fase inicial de contato, o calor e a ação mecânica aproximam os sistemas de asfalto novo e envelhecido, preenchendo os microvazios existentes na interface. Em seguida, ocorre a fase de difusão estável, controlada por interações termodinâmicas, principalmente pela energia potencial eletrostática e pelas forças de *van der Waals* (XING *et al*., 2023). Essas interações promovem a atração e o entrelaçamento das moléculas de asfalto. Nessa etapa, a temperatura exerce papel fundamental, pois reduz as forças intermoleculares de resistência e aumenta a movimentação térmica das moléculas, favorecendo a formação de uma zona de transição entre os ligantes (ZHANG *et al.*, 2024).

2.3.2. Grau de disponibilidade (*DoAv*) e grau de mistura (*DoB*)

O dimensionamento de misturas asfálticas recicladas foi historicamente baseado em duas hipóteses extremas sobre a interação entre os ligantes. A primeira é a teoria da *Black Rock* (Pedra Preta), que considera o RAP como um agregado inerte e assume disponibilidade nula (0%) do ligante envelhecido. A segunda é a hipótese de mistura total, adotada implicitamente por métodos tradicionais, que pressupõe disponibilidade de 100% do asfalto residual, assumindo que todo o ligante do RAP se fluidifica e participa da mistura com os demais componentes (XING *et al.,* 2023). Entretanto, diversos estudos mostram que o comportamento real das misturas situa-se entre esses dois extremos. Por esse motivo, a interação entre os ligantes passou a ser avaliada por meio de dois parâmetros: o Grau de Disponibilidade (*Degree of Availability* – DoAv) e o Grau de Mistura (*Degree of Blending* – DoB) (OREŠKOVIĆ *et al*., 2020; MA *et al.*, 2022).

O Grau de Disponibilidade (DoAv) corresponde à parcela do ligante envelhecido que efetivamente se desprende das partículas de RAP e se torna capaz de interagir com o ligante virgem. Em escala microscópica, esse ligante não apresenta comportamento uniforme, podendo ser dividido em frações disponíveis e indisponíveis. A fração disponível é formada pelo asfalto que amolece ou se fluidifica durante a usinagem. Já a fração indisponível inclui o ligante absorvido pelos poros dos agregados ao longo da vida útil do pavimento e a camada mais externa que sofreu envelhecimento intenso, tornando-se rígida e pouco responsiva ao aquecimento, comportando-se praticamente como uma crosta sólida (MA *et al.,* 2022), comportamento ilustrado na figura 2.4.

Figura 2.4 - Componentes do ligante asfáltico residual em uma partícula de RAP: fases disponíveis e indisponíveis.



Fonte: Adaptado de MA *et al.* (2022).

O Grau de Mistura (DoB), também denominado eficiência de mistura, representa a porcentagem do ligante disponível que consegue se difundir e se homogeneizar com o ligante virgem e, quando utilizado, com o agente rejuvenescedor. Essa parcela é a que efetivamente contribui para as propriedades reológicas finais da mistura asfáltica (OREŠKOVIĆ *et al.*, 2020). É importante destacar que disponibilidade e mistura não são conceitos equivalentes. Um ligante pode ser ativado termicamente e apresentar elevado DoAv, mas, devido ao curto tempo de mistura ou à alta viscosidade do sistema, não se integra adequadamente ao ligante novo, resultando em um baixo DoB (MA *et al.*, 2022).

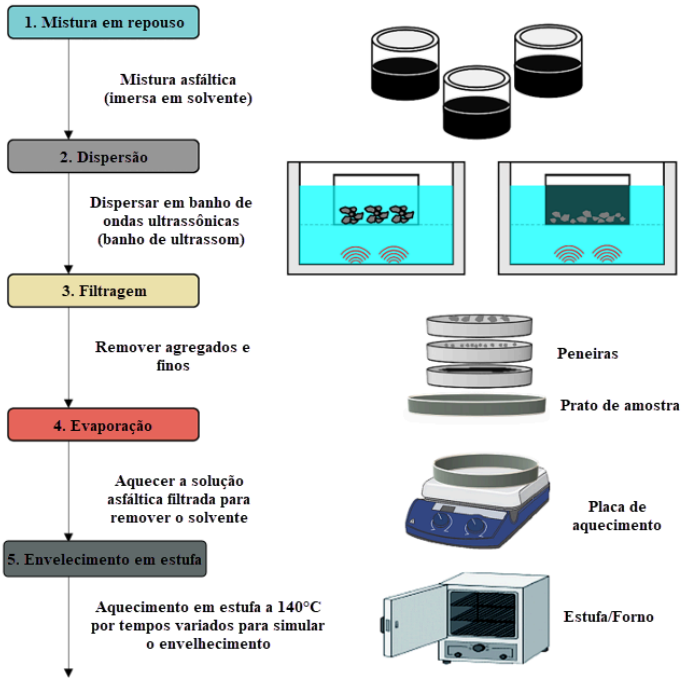
A falta de distinção entre esses parâmetros pode gerar erros importantes no projeto da mistura. Quando se assume, de forma equivocada, que todo o ligante do RAP está disponível, a quantidade de ligante virgem adicionada tende a ser reduzida, sob a expectativa de que o asfalto residual atenderá à demanda da mistura. No entanto, devido à disponibilidade parcial e à mistura incompleta do ligante envelhecido, a mistura final pode apresentar deficiência de ligante efetivo. Esse problema reduz a espessura da película de asfalto ao redor dos agregados e compromete a durabilidade do revestimento, aumentando sua vulnerabilidade à fadiga e à desagregação (MA *et al.*, 2022; XING *et al.*, 2023).

2.3.3. Desafios laboratoriais na extração e recuperação do ligante

A avaliação das propriedades reológicas do ligante residual e a determinação do grau de mistura (DoB) geralmente exigem a separação do asfalto envelhecido dos agregados em laboratório. Esse procedimento é realizado por meio da dissolução da matriz asfáltica com

solventes químicos, como o tricloroetileno (TCE) ou o diclorometano (DCM), seguida por etapas de centrifugação, filtração e recuperação do ligante em evaporador rotativo (*rotavapor*) (MA *et al.,* 2023), cujas etapas estão representadas na figura 2.5. Entretanto, diversos estudos apontam que os métodos convencionais de extração apresentam limitações importantes, pois podem alterar a microestrutura original do material e comprometer a determinação das proporções de ligante virgem e de agentes rejuvenescedores (PINHEIRO *et al.*, 2022; ZHONG *et al.*, 2023).

Figura 2.5 - Representação esquemática das etapas laboratoriais de extração e recuperação do ligante asfáltico.



Fonte: Adaptado de MA *et al.* (2023).

Um dos principais problemas ocorre na etapa de evaporação do solvente. O objetivo do *rotavapor* é remover completamente o solvente sem modificar as características do ligante. Porém, a elevada viscosidade do asfalto envelhecido dificulta a eliminação das últimas frações do produto químico, fazendo com que parte dele permaneça retida na amostra (PINHEIRO *et al.*, 2022). Mesmo em pequenas quantidades, esse resíduo pode provocar um amolecimento artificial do ligante, reduzindo seu módulo complexo e levando à subestimação da rigidez real do material em campo (ZHONG *et al.*, 2023). Por outro lado, prolongar o aquecimento para eliminar totalmente o solvente pode causar um envelhecimento oxidativo adicional, tornando o ligante artificialmente mais rígido (MA *et al.*, 2023).

Outro desafio está relacionado às etapas de centrifugação e filtração. Durante a lavagem do RAP, parte do fíler mineral e de partículas muito finas de argila pode atravessar os filtros e permanecer misturada à solução asfáltica. Diferentemente do solvente residual, que tende a amolecer o material, essas partículas minerais atuam como reforço do mastique e aumentam artificialmente a rigidez do ligante recuperado (ZHONG *et al.*, 2023). Essas alterações comprometem a precisão das medições realizadas em Reômetros de Cisalhamento Dinâmico (DSR), dificultando a avaliação correta da capacidade de relaxamento de tensões do asfalto.

Além disso, a extração química nem sempre consegue remover de forma uniforme todo o ligante presente no RAP, exigindo múltiplos ciclos para uma recuperação completa (ZHONG *et al.*, 2023). A película de asfalto que recobre os agregados apresenta diferentes níveis de envelhecimento em sua espessura: a camada mais externa costuma ser significativamente mais oxidada e rígida do que a camada interna, em função da maior exposição ao oxigênio e às intempéries ao longo da vida útil do pavimento (FERREIRA *et al*., 2021; ZHONG *et al.*, 2023).

Como a remoção total desse material é difícil de ser alcançada em um único ciclo de extração, o ligante recuperado inicialmente tende a representar apenas a fração mais superficial e severamente envelhecida. Esses fatores demonstram que a análise isolada do ligante possui limitações metodológicas e nem sempre representa com precisão o comportamento real da mistura asfáltica em serviço, reforçando a necessidade de métodos de avaliação de desempenho que considerem a mistura de forma integral (FERREIRA et al., 2021; PINHEIRO et al., 2022).

2.4. Modificação química: a ação de agentes rejuvenescedores

A restauração das propriedades do ligante asfáltico envelhecido é um dos principais desafios para a utilização de misturas asfálticas com altos teores de RAP (KASEER *et al*., 2019; YU *et al*., 2024). Embora o controle dos *clusters* contribua para reduzir a variabilidade física do material, ele não é suficiente para corrigir a elevada rigidez do asfalto envelhecido. Nesse contexto, a incorporação de agentes rejuvenescedores, também chamados de agentes de reciclagem, tornou-se a principal estratégia utilizada para recuperar parte da flexibilidade da matriz asfáltica e favorecer a interação entre os materiais reciclados e os ligantes virgens (KASEER *et al.*, 2019; WANG *et al*., 2024).

2.4.1. Tipos e mecanismos de rejuvenescimento

A mitigação dos efeitos causados pelo ligante envelhecido requer a incorporação de aditivos químicos às misturas asfálticas recicladas. Nesse contexto, é importante diferenciar os agentes amolecedores dos agentes rejuvenescedores. Os agentes amolecedores, como óleos de fluxo e óleos de suspensão, têm como principal função reduzir a viscosidade da matriz asfáltica, atuando basicamente como solventes. Já os agentes rejuvenescedores apresentam um mecanismo de ação mais complexo, pois são desenvolvidos para restaurar as propriedades físicas e químicas do asfalto oxidado, reequilibrando sua composição molecular original (KASEER *et al*., 2019; YU *et al*., 2024).

Do ponto de vista da química coloidal, o ligante asfáltico é formado por uma fase insolúvel de alta polaridade, composta pelos asfaltenos, dispersa em uma fase contínua de maltenos, constituída por saturados, aromáticos e resinas. Durante a vida útil do pavimento, os processos de oxidação e volatilização reduzem a fração leve de maltenos e favorecem a aglomeração dos asfaltenos em estruturas macromoleculares densas, frequentemente observadas em microscopia como estruturas em formato de abelha (YU *et al*., 2024). O rejuvenescimento ocorre pela adição de produtos ricos em frações leves, especialmente hidrocarbonetos aromáticos, que restabelecem a capacidade dispersiva da fase contínua. Como resultado, os aglomerados de asfaltenos são dispersos, o equilíbrio químico da matriz é parcialmente recuperado e o material volta a apresentar um comportamento viscoelástico mais adequado (KASEER *et al*., 2019; WANG *et al*., 2024).

Para promover esse reequilíbrio, a indústria desenvolveu diferentes tipos de agentes rejuvenescedores, classificados de acordo com sua origem e composição química. Entre os principais estão os derivados de petróleo, como extratos aromáticos, óleos parafínicos e óleos naftênicos, e os produtos de base orgânica ou biológica, como triglicerídeos, e ácidos graxos (KASEER *et al*., 2019), cujas características estão detalhadas na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Categorias, tipos e descrições dos principais agentes de reciclagem.

Categoria	Exemplo	Descrição
Óleos parafínicos	Óleo de motor usado (WEO) Resíduos de fundo de óleo de motor usado (WEOOB) Valero VP 165® Storbit®	Óleos lubrificantes refinados provenientes de oficinas de reparação de motores.
Extratos aromáticos	Hydrolene® Reclamite® Cyclogen L® ValAro 130A+	Produtos petrolíferos refinados com alto teor de componentes de óleos aromáticos da indústria petroquímica.
Óleos naftênicos	SonneWarmix RJ™ Ergon HyPrene®	Hidrocarbonetos projetados para modificação de ligantes (asfálticos).
Triglicerídeos e ácidos graxos	Óleo vegetal usado Graxa vegetal usada Graxa marrom (Brown grease) Delta S	Derivados de óleos vegetais e alguns com outros componentes químicos adicionados.
Óleo de pinho	Sylvaroad™ RP1000 Hydrogreen®	Subprodutos da indústria de papel (também usados como agentes anti-decapantes líquidos e emulsificantes).

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

Estudos recentes indicam que os rejuvenescedores de base biológica, produzidos a partir de óleos vegetais ou resíduos animais, além de apresentarem vantagens ambientais, podem exigir dosagens menores para recuperar as propriedades do ligante, devido à sua elevada capacidade de penetração na microestrutura do RAP (KASEER *et al*., 2019; WANG *et al*., 2024).

Além da recomposição química do ligante, a eficiência do rejuvenescimento depende de processos físicos e termodinâmicos que ocorrem durante a usinagem. Esses processos podem ser divididos em três etapas: dispersão, difusão e compatibilidade. A dispersão corresponde à distribuição inicial do agente rejuvenescedor na mistura e é favorecida pelo tempo de mistura e pelas temperaturas de usinagem. Em seguida, ocorre a difusão, quando os componentes leves do rejuvenescedor migram das regiões de maior concentração para o interior da película de asfalto envelhecido que recobre os agregados do RAP. Por fim, a etapa de compatibilidade representa a estabilidade termodinâmica da mistura final a longo prazo, garantindo que o agente rejuvenescedor permaneça integrado à matriz asfáltica sem que ocorra a separação das fases (KASEER *et al*., 2019).

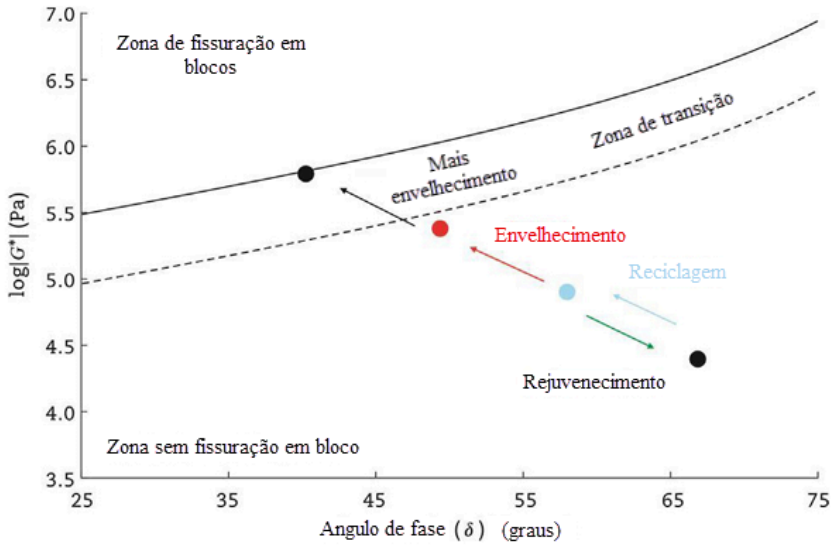
2.4.2. Efeitos no desempenho mecânico de longo prazo

A modificação química promovida pelos agentes rejuvenescedores gera efeitos importantes no comportamento mecânico das misturas asfálticas ao longo de sua vida útil. O

principal benefício está na recuperação da capacidade do ligante de relaxar tensões. Como consequência, a mistura passa a apresentar maior resistência ao trincamento por fadiga, provocado pela repetição das cargas de tráfego, e ao trincamento térmico em baixas temperaturas, reduzindo a fragilidade característica das misturas com elevados teores de RAP (ANTUNES *et al*., 2019; KASEER *et al*., 2019).

Para ilustrar esse processo, a literatura frequentemente utiliza o diagrama de *Black Space*, que relaciona o módulo de cisalhamento complexo (|G*|) ao ângulo de fase (δ) do ligante. Durante o envelhecimento em campo, o asfalto perde parte de seu comportamento viscoso e torna-se mais rígido, deslocando-se para uma região associada à maior suscetibilidade ao trincamento. A adição controlada de rejuvenescedores tende a reverter esse comportamento, reduzindo o módulo complexo da matriz e aumentando o ângulo de fase. Com isso, parte da flexibilidade necessária para o desempenho e a durabilidade da mistura é recuperada (YU *et al*., 2024), comportamento que pode ser observado no diagrama da figura 2.6.

Figura 2.6 - Representação no diagrama de *Black Space* das alterações reológicas geradas pelo envelhecimento e pelo rejuvenescimento do ligante.



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

Por outro lado, o aumento da flexibilidade também pode trazer efeitos indesejáveis quando a dosagem não é adequada. A literatura destaca que o uso excessivo de agentes rejuvenescedores pode provocar um amolecimento excessivo da matriz asfáltica (KASEER *et al*., 2019). Nessa condição, a rigidez proporcionada pelo ligante envelhecido do RAP é reduzida de forma significativa, comprometendo a resistência da mistura à deformação

permanente. Como resultado, o pavimento torna-se mais suscetível ao afundamento em trilha de roda, principalmente em regiões de clima quente (ANTUNES *et al*., 2019; YU *et al*., 2024). Além disso, a superdosagem pode prejudicar a adesão entre o ligante e os agregados, favorecendo a ocorrência de danos por umidade e processos de desagregação (KASEER *et al*., 2019).

Outro aspecto importante está relacionado à durabilidade do efeito rejuvenescedor. Estudos indicam que a eficiência desses agentes tende a diminuir ao longo do tempo, uma vez que os ligantes rejuvenescidos podem apresentar taxas de re-envelhecimento e oxidação secundária superiores às observadas em ligantes virgens convencionais (KASEER *et al*., 2019; YU *et al*., 2024).

Diante desse equilíbrio delicado entre benefícios e limitações, maior resistência ao trincamento e potencial redução da resistência à deformação permanente, a definição da dosagem ótima torna-se uma etapa fundamental do projeto. A quantidade de rejuvenescedor deve ser suficiente para recuperar a flexibilidade do ligante e retardar o surgimento de trincas, sem comprometer a estabilidade da mistura frente ao afundamento. Essa necessidade de equilibrar mecanismos de desempenho opostos reforça as limitações dos métodos de dosagem exclusivamente volumétricos e evidencia a importância de abordagens baseadas na avaliação real do comportamento mecânico da mistura.

2.5. Evolução dos métodos de dosagem e a metodologia *Balanced Mix Design* (BMD)

O desenvolvimento das misturas asfálticas passou por mudanças importantes nas últimas décadas. Durante muitos anos, o projeto dessas misturas foi baseado principalmente em parâmetros físicos e volumétricos para definir as proporções entre agregados e ligante asfáltico (MONTEIRO *et al*., 2023). Entretanto, a busca por soluções mais sustentáveis e o aumento do uso de elevadas taxas de RAP trouxeram novos desafios relacionados ao comportamento químico e mecânico dos materiais (MONTAÑEZ *et al*., 2025). Diante desse cenário, tornou-se necessária a revisão das metodologias tradicionais de dosagem, impulsionando a transição de abordagens baseadas exclusivamente em parâmetros volumétricos para métodos que consideram diretamente o desempenho da mistura asfáltica (LI *et al*., 2023; MONTAÑEZ *et al.*, 2025).

2.5.1. Limitações do método Marshall e do Superpave volumétrico

Os métodos tradicionais de dosagem de misturas asfálticas, especialmente o método Marshall e o sistema Superpave - método de dosagem volumétrica internacional - foram desenvolvidos originalmente para misturas produzidas apenas com materiais virgens. Em ambos os casos, o dimensionamento baseia-se no controle das proporções entre agregados e ligante asfáltico por meio de parâmetros físicos e volumétricos, como o volume de vazios de ar (Va) e o Volume de Vazios no Agregado Mineral (VMA). A premissa é que o atendimento a esses parâmetros seja suficiente para garantir a estabilidade e a durabilidade do revestimento sob a ação do tráfego (MONTEIRO *et al*., 2023).

Embora essa abordagem tenha apresentado bons resultados em misturas asfálticas convencionais, diversos estudos apontam limitações importantes quando ela é aplicada à reciclagem de pavimentos. O método Marshall, amplamente utilizado no Brasil por meio de especificações como a DNIT 031/2006-ES, assim como o Superpave baseado exclusivamente em critérios volumétricos, não consegue representar adequadamente as interações físico-químicas nem o comportamento mecânico de misturas que contêm ligantes fortemente envelhecidos (CENTOFANTE *et al*., 2018; MONTEIRO *et al*., 2023).

Quando uma mistura com elevado teor de RAP é projetada apenas com base nesses parâmetros, o dimensionamento considera o esqueleto mineral e os vazios previstos em projeto, mas não avalia de forma direta a interação entre os ligantes nem a rigidez efetiva da mistura. Como consequência, uma mistura reciclada pode atender aos requisitos normativos de densidade e volumetria em laboratório e, ainda assim, apresentar desempenho insatisfatório em campo. Isso ocorre porque o ligante envelhecido do RAP tende a aumentar a rigidez da mistura, dificultando a compactação e elevando a suscetibilidade ao trincamento por fadiga e a outras falhas relacionadas à perda de coesão (CENTOFANTE *et al*., 2018).

Essa incerteza quanto ao desempenho mecânico também contribui para a resistência de muitos órgãos rodoviários e projetistas em adotar teores elevados de material reciclado. Em diversos casos, a incorporação de RAP é limitada a valores inferiores a 25%, devido à preocupação com possíveis reduções na vida útil do pavimento (CENTOFANTE *et al*., 2018). Dessa forma, as limitações dos métodos tradicionais de dosagem representam uma das principais barreiras para ampliar o uso sustentável do RAP. Esse cenário reforça a necessidade de metodologias que, além de avaliar as características volumétricas da mistura, também

considerem critérios diretamente relacionados ao seu desempenho mecânico em longo prazo (LI *et al*., 2023).

Historicamente, o método Superpave representou um avanço em relação ao Marshall devido à melhoria no processo de compactação giratória, mas falhou ao tentar viabilizar a reciclagem com altas taxas de RAP. A literatura aponta que o Superpave manteve o foco estritamente volumétrico, assumindo a premissa irreal de que ocorre a mistura total entre o ligante virgem e o asfalto velho do material fresado (SHARMA *et al.*, 2022).

Além dessa premissa química equivocada, o método Superpave incentiva o uso de misturas com graduação mais graúda, o que entra em conflito direto com o material gerado no processo de fresagem, que possui uma grande fração de finos. Na prática, a aplicação rigorosa de critérios volumétricos (como o controle de vazios e a relação betume/pó) em misturas recicladas resultou em asfaltos com deficiência de ligante efetivo. Essa deficiência tornou as misturas mais secas, rígidas e altamente suscetíveis ao trincamento prematuro e à fadiga em campo (SHARMA *et al*., 2022; YU *et al*., 2024).

Para superar as falhas das abordagens puramente volumétricas do Marshall e do Superpave, tornou-se necessária a adoção de um novo conceito de projeto. A metodologia *Balanced Mix Design* soluciona esse problema ao abandonar a tentativa de prever o comportamento da mistura apenas por cálculos de volumes. O BMD exige a validação mecânica direta do material em laboratório, garantindo que o asfalto reciclado alcance o desempenho exigido contra o trincamento e a deformação permanente, independentemente de sua composição volumétrica inicial (LI *et al*., 2023).

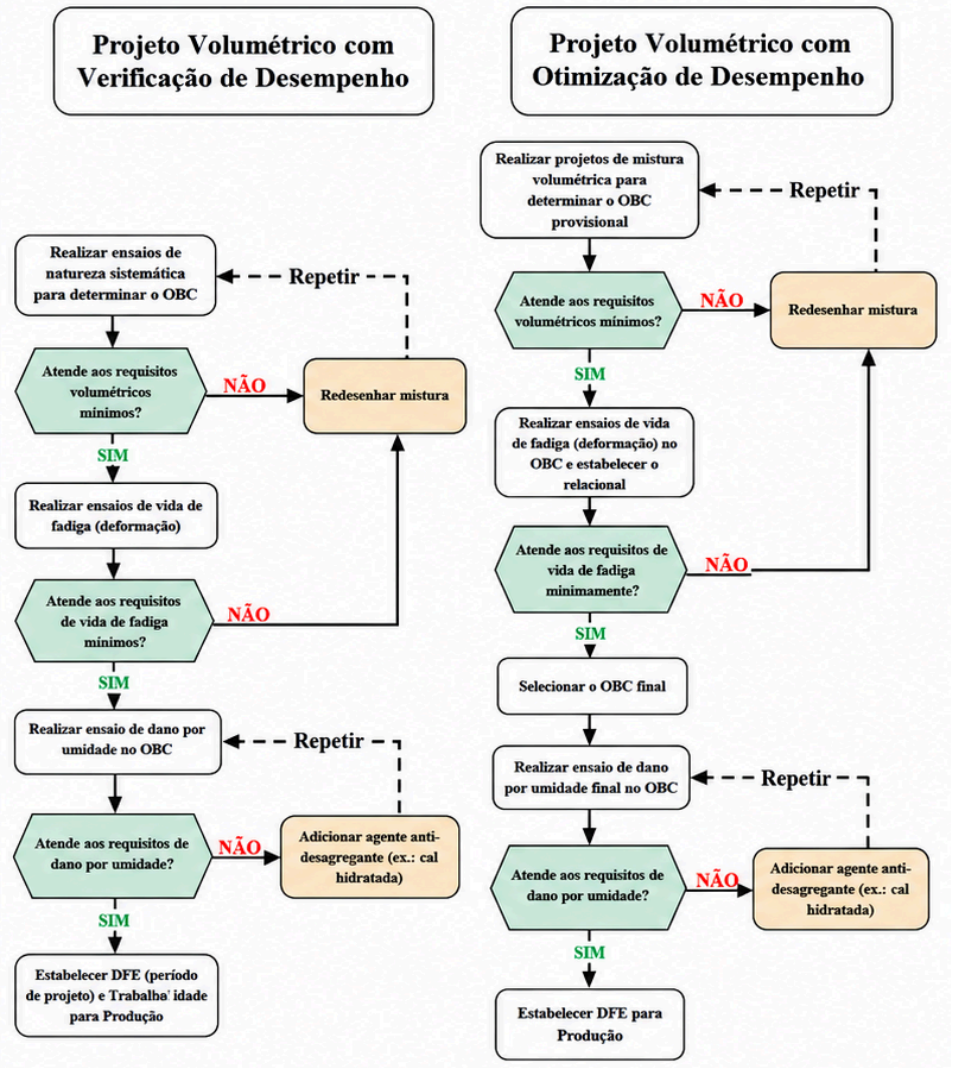
2.5.2. A metodologia *Balanced Mix Design* (BMD)

Para superar as limitações dos métodos baseados exclusivamente em parâmetros volumétricos e aumentar a durabilidade dos pavimentos, foi desenvolvida a metodologia BMD, ou Dosagem Balanceada de Misturas. De acordo com a norma internacional AASHTO PP 105-20, o BMD consiste em um método de dosagem que utiliza ensaios de desempenho realizados em corpos de prova adequadamente condicionados para minimizar diferentes modos de falha, considerando fatores como envelhecimento da mistura, tráfego, clima e posição da camada na estrutura do pavimento (LI *et al.*, 2023).

O princípio central do BMD é buscar o equilíbrio entre propriedades mecânicas que apresentam comportamentos opostos. O aumento do teor de ligante asfáltico ou a incorporação de agentes rejuvenescedores tende a melhorar a flexibilidade da mistura e sua resistência ao trincamento térmico e por fadiga. Por outro lado, o excesso desses materiais pode reduzir a estabilidade da matriz e aumentar a suscetibilidade à deformação permanente sob a ação do tráfego (KASEER *et al.*, 2019). Em sentido contrário, a redução do teor de ligante melhora a resistência ao afundamento, mas pode tornar a mistura mais rígida e vulnerável ao surgimento de trincas (LI *et al.*, 2023). Assim, o método busca determinar o Teor Ótimo de Ligante (OAC) capaz de atender simultaneamente aos requisitos mínimos de resistência para ambos os mecanismos de deterioração (LI *et al.*, 2023).

A aplicação do BMD pode ocorrer em diferentes níveis de complexidade, como pode ser observado nas figuras 2.7 e 2.8 a seguir.

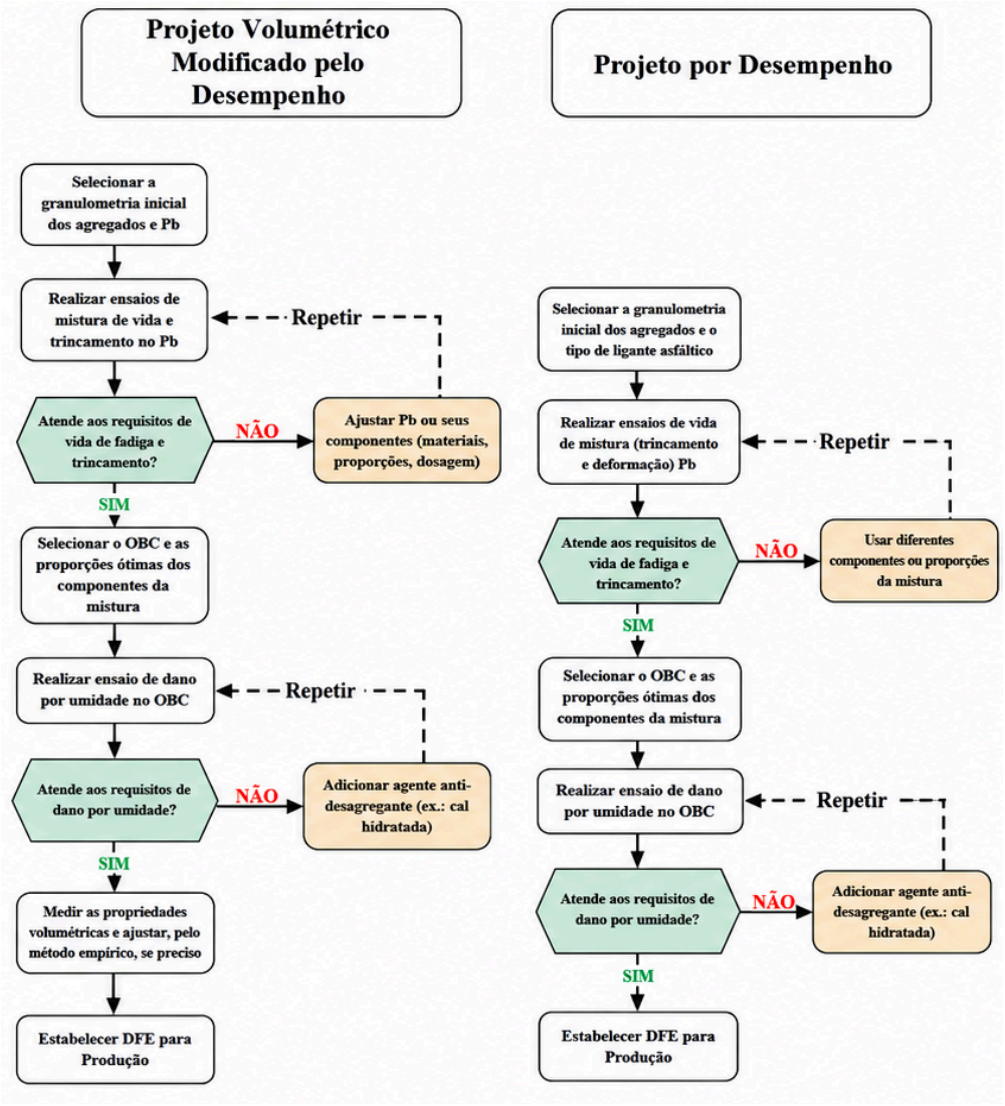
Figura 2.7 - Fluxograma das duas primeiras abordagens de dosagem da metodologia *Balanced Mix Design* segundo a AASHTO PP 105-20.



Fonte: Adaptado de LI *et al.* (2023).

Normas internacionais estabelecem quatro abordagens principais: (1) dosagem volumétrica com verificação de desempenho, em que a mistura é projetada pelos métodos convencionais e posteriormente avaliada por ensaios mecânicos; (2) dosagem volumétrica com otimização de desempenho, que permite ajustes no teor de ligante para atender aos critérios mecânicos.

Figura 2.8 - Fluxograma das duas últimas abordagens de dosagem da metodologia *Balanced Mix Design* segundo a AASHTO PP 105-20.



Fonte: Adaptado de LI *et al.* (2023).

Tem-se também a (3) dosagem volumétrica modificada pelo desempenho, na qual determinados requisitos volumétricos, como VMA e volume de vazios, podem ser flexibilizados desde que a mistura apresente desempenho satisfatório; e (4) dosagem baseada em desempenho, em que a definição das proporções dos materiais é feita prioritariamente a partir dos resultados dos ensaios mecânicos, deixando os parâmetros volumétricos em segundo plano (LI *et al.*, 2023).

No contexto da reciclagem de pavimentos, o BMD torna-se especialmente relevante. A variabilidade do RAP e as incertezas relacionadas ao Grau de Mistura (DoB) dificultam a previsão precisa do comportamento da mistura apenas por meio de cálculos volumétricos. Nesse cenário, o método funciona como uma ferramenta de validação do desempenho real da

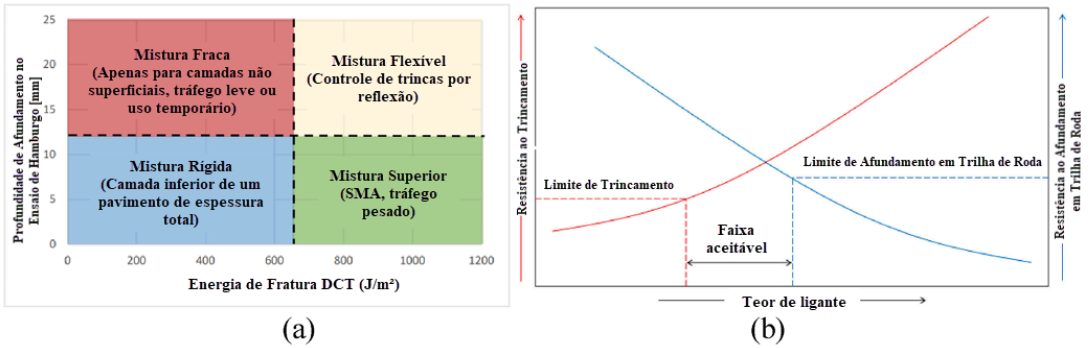
mistura (VANGALA *et al.*, 2025). Ao avaliar corpos de prova já compactados, o BMD verifica diretamente os efeitos da interação entre o ligante virgem, o ligante envelhecido presente no RAP e eventuais aditivos, como os agentes rejuvenescedores (MONTAÑEZ *et al.*, 2025). Dessa forma, torna-se possível comprovar que misturas com elevados teores de RAP, entre 30% e 40%, podem alcançar desempenho estrutural e durabilidade equivalentes ou até superiores aos de misturas convencionais, permitindo a ampliação do uso de material reciclado com segurança técnica (VANGALA *et al.*, 2025).

2.5.3. Uso de Diagramas de Espaço de Desempenho (PSD)

A análise dos resultados na metodologia BMD é frequentemente realizada por meio do Diagrama de Espaço de Desempenho (*Performance Space Diagram* - PSD). O PSD é um gráfico bidimensional que relaciona, simultaneamente, os resultados de um ensaio de resistência ao trincamento, normalmente representado no eixo das abscissas (x), e de um ensaio de resistência à deformação permanente, representado no eixo das ordenadas (y) (LI *et al.*, 2023).

Ao definir os limites normativos mínimos e máximos para cada mecanismo de falha, o diagrama divide o plano em quatro regiões distintas. A interseção dos critérios de aprovação dos dois ensaios forma uma área central denominada zona de aceitação ou janela de balanceamento. Cada traço de mistura asfáltica avaliado em laboratório é representado por um ponto nesse espaço. Assim, o projetista consegue verificar de forma rápida e visual se a mistura atende simultaneamente aos requisitos de resistência ao trincamento e à deformação permanente ou se apresenta desempenho insuficiente em um ou ambos os critérios mecânicos, como pode ser observado na figura 2.9 (LI *et al.*, 2023).

Figura 2.9 - Diagrama de Espaço de Desempenho (PSD) bidimensional ilustrando a zona de aceitação para o balanceamento da mistura asfáltica.



Fonte: Adaptado de LI *et al.* (2023).

No desenvolvimento de misturas asfálticas recicladas, o PSD também funciona como uma ferramenta de calibração da dosagem. Alterações na composição da mistura, como a variação do teor de RAP, o ajuste da quantidade de ligante virgem ou a modificação da dosagem de agentes rejuvenescedores, provocam um deslocamento faixa aceitável do diagrama (LI *et al.*, 2023).

Por exemplo, o aumento da dosagem de um agente de reciclagem tende a deslocar o ponto para regiões associadas a maior flexibilidade e resistência à fadiga. Em contrapartida, esse mesmo deslocamento pode aproximar a mistura dos limites relacionados ao afundamento plástico. Dessa forma, a representação gráfica auxilia o engenheiro na realização de ajustes sucessivos na formulação até que a mistura alcance uma condição de equilíbrio capaz de atender aos diferentes requisitos de desempenho.

Além disso, estudos recentes apontam a evolução dessa ferramenta para o Diagrama de Espaço de Desempenho Tridimensional (3-D PSD). Nessa abordagem, é incorporado um terceiro eixo de análise, geralmente relacionado ao módulo secante ou à estabilidade global da matriz asfáltica (LI *et al.*, 2023). Com isso, torna-se possível avaliar simultaneamente a rigidez associada ao asfalto oxidado presente no RAP e as resistências ao trincamento e à deformação permanente. Essa ampliação da análise permite verificar se misturas com elevados teores de material reciclado, além de atenderem aos critérios básicos de desempenho, apresentam comportamento estrutural adequado ao longo da vida útil, aumentando a confiabilidade e o rigor técnico da dosagem balanceada.

2.6. Ensaios mecânicos de desempenho no contexto do BMD

A aplicação da metodologia BMD requer que os parâmetros volumétricos da mistura asfáltica sejam complementados e validados por ensaios laboratoriais de desempenho. Para isso, é necessário utilizar testes mecânicos capazes de representar, de forma adequada, as condições climáticas e as solicitações de tráfego às quais o pavimento estará submetido ao longo de sua vida útil. No caso das misturas asfálticas recicladas, esses ensaios são fundamentais para avaliar os efeitos da presença de ligantes envelhecidos e de possíveis agentes rejuvenescedores. De modo geral, a avaliação concentra-se em dois mecanismos de deterioração considerados críticos: a deformação permanente e o trincamento.

2.6.1. Avaliação da resistência à deformação permanente (*rutting*)

A deformação permanente, frequentemente denominada *rutting* (afundamento de trilha de roda), é uma falha plástica estrutural que ocorre principalmente em regiões de clima quente e sob a ação de cargas de tráfego lentas e pesadas (LI *et al*., 2023). Em misturas asfálticas recicladas com elevados teores de RAP, a suscetibilidade a esse defeito raramente está associada ao material fresado, pois a rigidez do ligante envelhecido tende a aumentar a resistência ao afundamento. O risco de *rutting* surge, sobretudo, quando há excesso de ligante virgem ou de agentes rejuvenescedores utilizados para recuperar a flexibilidade da mistura (LI *et al*., 2023; MONTAÑEZ *et al*., 2025). Nesses casos, a matriz asfáltica torna-se excessivamente fluida, reduzindo o intertravamento entre os agregados do esqueleto mineral.

Para verificar se a recuperação da resistência ao trincamento não compromete a estabilidade da mistura, a metodologia BMD prevê a avaliação direta da deformação permanente em laboratório. Atualmente, os ensaios mais utilizados são os testes de trilha de roda, que simulam a ação do tráfego sobre o revestimento. Entre os equipamentos mais empregados destacam-se o *Hamburg Wheel Tracking Test* (HWTT) e o *Asphalt Pavement Analyzer* (APA) (LI *et al*., 2023). Nesses ensaios, corpos de prova compactados são geralmente submersos em água aquecida e submetidos a milhares de passagens de uma roda metálica ou pneumática instrumentada. Ao final do teste, mede-se a profundidade do afundamento produzido na amostra, que deve permanecer abaixo dos limites estabelecidos pelas especificações do projeto (MONTAÑEZ *et al*., 2025).

Tabela 2.2 - Principais ensaios laboratoriais para avaliação da resistência à deformação permanente no escopo da metodologia BMD.

Norma de Ensaio		Parâmetro de trilha de roda (deformação permanente)	Temperatura do ensaio	Número de corpos de prova (amostras)	Preparação do corpo de prova e tempo de ensaio	Custo do equipamento	Praticabilidade geral no CQ (Controle de Qualidade)
ASTM D6927 Marshall stability test		**Marshall stability: Estabilidade Marshall**	60ºC (outros)	3	Sem corte ou colagem; Tempo total: 1 dia	< $10000	**Boa**
AASHTO T 324 HWTT		**Rut depth: Profundidade da trilha de roda**	50ºC (outros)	4	1 corte por corpo de prova; Tempo total: 2 dias	$50000	**Regular**
AASHTO T 340 APA		**Flow number: Número de fluxo (Flow number)**	64ºC (outros)	4	Sem corte ou colagem; Tempo total: 2 dias	> $100000	**Regular**
AASHTO TP79 Flow number test		**Permanent shear strain: Deformação cisalhante permanente**	Alta temperatura	3	1 extração de testemunho (coring) e 2 cortes por corpo de prova; Tempo total: 4 dias	$85000	**Regular**
AASHTO T320 Superpave SST			Alta temperatura	3	Colagem e instrumentação; Tempo total: 2 dias	> $100000	**Ruim**
AASHTO TP116 iRLPD test		**Minimum strain rate: Taxa de deformação mínima**	55ºC	3	1 extração de testemunho, 2 cortes por corpo de prova e colagem; Tempo total: 4 dias	$85000	**Ruim**
Stress sweep rutting (SSR) test		**Permanent deformation model: Modelo de deformação permanente**	Alta e baixa temperatura	4	1 extração de testemunho, 2 cortes por corpo de prova e colagem; Tempo total: 4 dias	$85000	**Ruim**
High temperature IDT strength test			Alta temperatura	3	Sem corte ou colagem; Tempo total: 1 dia	< $10000	**Boa**
IDEAL-RT shear strength test		**IDT strength: Resistência IDT (Tração Indireta)**	50ºC	3	Sem corte ou colagem; Tempo total: 1 dia	< $10000	**Boa**

Fonte: Adaptado de LI *et al.* (2023).

No contexto brasileiro, a resistência à deformação permanente é frequentemente avaliada por meio de ensaios uniaxiais de carga repetida, dos quais se obtém o parâmetro conhecido como *Flow Number* (FN). Nesse ensaio, aplica-se uma sequência de pulsos de compressão axial em corpos de prova cilíndricos de concreto asfáltico, condicionados a temperaturas elevadas, normalmente de 60 °C, de modo a reproduzir condições severas de aquecimento do pavimento em serviço (CENTOFANTE *et al*., 2018; MONTEIRO *et al*., 2023). Durante o carregamento, a mistura acumula deformações progressivamente. O *Flow Number* corresponde ao número de ciclos suportados até a transição da fluência secundária, caracterizada por taxa de deformação aproximadamente constante, para a fluência terciária, marcada pelo aumento acelerado das deformações e pelo início da ruptura plástica (CENTOFANTE *et al*., 2018).

2.6.2. Avaliação da resistência ao trincamento (*cracking*)

Embora a elevada rigidez proporcionada pelo ligante asfáltico envelhecido aumente a resistência à deformação permanente, ela também está entre os principais fatores associados ao trincamento (*cracking*) das misturas asfálticas. A oxidação do ligante e a redução da fração de maltenos presente no RAP diminuem significativamente a capacidade da mistura de dissipar tensões. Por isso, na metodologia BMD, a avaliação da resistência ao trincamento atua como complemento indispensável à análise de afundamento, garantindo que o aumento da resistência à deformação plástica não resulte em um revestimento excessivamente rígido e suscetível à fadiga (LI *et al.*, 2023).

Para avaliar o desempenho da mistura em temperaturas intermediárias e estimar sua durabilidade sob carregamentos repetidos, os protocolos internacionais do BMD utilizam ensaios voltados à propagação de trincas. Entre os métodos mais difundidos destacam-se o *Illinois Flexibility Index Test* (I-FIT) e o *Indirect Tensile Asphalt Cracking Test* (IDEAL-CT). O ensaio I-FIT utiliza corpos de prova semicirculares entalhados (*Semi-Circular Bending* – SCB) para determinar o Índice de Flexibilidade (FI) da mistura. Esse parâmetro é obtido a partir da relação entre a energia total de fratura e a inclinação da curva pós-pico de carga registrada durante a ruptura da amostra (LI *et al.*, 2023).

O ensaio IDEAL-CT, por sua vez, tem sido amplamente adotado por usinas e órgãos rodoviários por dispensar cortes ou entalhes complexos nos corpos de prova. O método é realizado em amostras cilíndricas padrão submetidas à compressão diametral, e os dados da

curva carga-deslocamento são utilizados para calcular o Índice de Tolerância ao Trincamento (CTIndex) (LI *et al.*, 2023). De acordo com a literatura, esse índice é governado principalmente por duas propriedades da mistura: a tenacidade e a ductilidade. A tenacidade é representada pela energia de fratura (Gf) necessária para iniciar a ruptura do corpo de prova, enquanto a ductilidade é avaliada pelo deslocamento correspondente a 75% da carga pós-pico (l75) e pela inclinação dessa curva (|m75|).

Em regiões sujeitas a temperaturas muito baixas e a ciclos de congelamento, os protocolos BMD também recomendam a avaliação do trincamento térmico por meio do ensaio *Disk-Shaped Compact Tension* (DCT). Esse ensaio é utilizado para verificar a capacidade da mistura de resistir às tensões de tração geradas pela contração térmica da matriz betuminosa (MONTAÑEZ *et al.*, 2025).

2.7. A Realidade normativa brasileira e a sustentabilidade

A busca por soluções mais sustentáveis para a infraestrutura de transportes tem incentivado a adoção de práticas capazes de reduzir os impactos ambientais associados às obras de pavimentação. Nesse contexto, a utilização de RAP em substituição parcial aos agregados minerais e aos ligantes asfálticos virgens destaca-se como uma alternativa técnica e ambientalmente vantajosa, contribuindo para a redução da geração de resíduos e do consumo de recursos naturais (ANTUNES *et al*., 2019). No entanto, para que esses benefícios sejam efetivamente alcançados, é fundamental que a incorporação do RAP esteja em conformidade com as exigências das normas técnicas vigentes, garantindo que os ganhos ambientais não comprometam o desempenho mecânico e a durabilidade dos pavimentos (MASCARENHAS *et al*., 2023).

2.7.1. A transição para o método MeDiNa e a inserção do BMD

Como já exposto, o dimensionamento de pavimentos flexíveis e a dosagem de misturas asfálticas no Brasil foram, durante décadas, baseados em correlações empíricas e parâmetros essencialmente volumétricos. Na prática, os projetos são desenvolvidos principalmente a partir de faixas granulométricas e requisitos físicos definidos em especificações tradicionais, como a DNIT 031/2006-ES (MONTEIRO *et al*., 2023). Entretanto, diversos estudos apontam que esses métodos não conseguem prever com precisão o desempenho estrutural das misturas, especialmente quando há incorporação de materiais

reciclados com ligantes envelhecidos e oxidativos, cujas características influenciam diretamente a resistência à fadiga e a rigidez da matriz asfáltica (CENTOFANTE *et al*., 2018).

Em resposta a essa limitação, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) vem promovendo a modernização dos procedimentos de projeto por meio da adoção do método Mecanístico-Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos, denominado MeDiNa (MASCARENHAS *et al*., 2023). Essa metodologia supera a análise baseada apenas em vazios e densidade, exigindo uma caracterização mais completa do comportamento viscoelástico dos materiais. Assim, passa a ser necessária a determinação de propriedades mecânicas fundamentais da mistura, como o módulo de resiliência, o módulo dinâmico e a resistência à deformação permanente (CENTOFANTE *et al*., 2018; MONTEIRO *et al*., 2023).

Nesse contexto, a aplicação dos princípios do *Balanced Mix Design* apresenta forte compatibilidade com a filosofia do dimensionamento mecanístico. Ao avaliar a mistura asfáltica reciclada por meio de ensaios de desempenho e estabelecer critérios equilibrados entre resistência ao trincamento e à deformação permanente, o BMD permite verificar experimentalmente se o material atende às propriedades mecânicas necessárias para utilização nos modelos de previsão empregados pelo MeDiNa. Dessa forma, a formulação desenvolvida em laboratório passa a estar diretamente associada ao desempenho esperado do pavimento em campo.

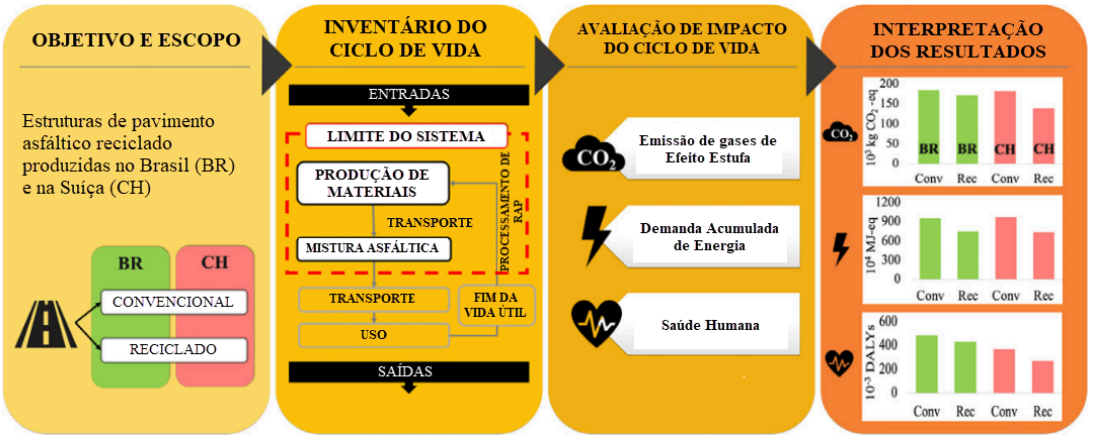
Essa evolução também pode ser observada no desenvolvimento das normas brasileiras relacionadas ao uso de materiais reciclados. Um exemplo é a publicação da especificação DNIT 033/2021-ES, que estabelece critérios para a execução de concreto asfáltico reciclado usinado a quente (MASCARENHAS *et al*., 2023). O avanço dessas regulamentações evidencia a crescente incorporação de conceitos relacionados ao desempenho mecânico e à reciclagem de pavimentos. Nesse cenário, a combinação entre o controle adequado da interação dos ligantes e a adoção de metodologias baseadas em desempenho, como o BMD e o MeDiNa, representa uma alternativa tecnicamente consistente para ampliar o uso de RAP no Brasil, contribuindo para pavimentos mais duráveis e para práticas mais sustentáveis na infraestrutura rodoviária.

2.7.2. Avaliação de Desempenho Ambiental (LCA) e economia circular

A incorporação do RAP na construção e manutenção de rodovias insere a engenharia de pavimentos no contexto da economia circular. Essa abordagem substitui o modelo linear tradicional — baseado na extração de matérias-primas virgens, produção e descarte de resíduos — por processos cíclicos de reaproveitamento. Nesse modelo, o material fresado removido ao final da vida útil do pavimento é reinserido como componente estrutural na produção de novas misturas asfálticas (ANTUNES *et al.*, 2019; SANTOLINI *et al.*, 2024).

Para avaliar de forma quantitativa a viabilidade dessas estratégias sustentáveis e evitar estimativas ambientais superficiais, a literatura científica e as agências de transporte utilizam a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment* - LCA). O LCA estabelece um inventário detalhado dos impactos ambientais gerados ao longo de todo o ciclo da infraestrutura rodoviária. A análise considera desde a extração da rocha e do petróleo, passando pelas etapas de transporte e processamento na usina, até a compactação em campo, as atividades de manutenção e a destinação final do pavimento (MASCARENHAS *et al.*, 2023; SANTOLINI *et al.*, 2024), conforme o fluxograma metodológico apresentado na figura 2.10.

Figura 2.10 - Fluxograma metodológico da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) aplicado a pavimentos asfálticos reciclados, desde a produção dos materiais até a avaliação de impactos ambientais.



Fonte: Adaptado de MASCARENHAS *et al.* (2023).

Estudos de LCA aplicados a pavimentos e à realidade produtiva brasileira demonstram que a substituição de materiais virgens por teores de 20% a 30% de RAP reduz significativamente os impactos ambientais da infraestrutura. Os resultados indicam diminuição da demanda de energia cumulativa, principalmente devido à menor necessidade de

extração e refino de novo ligante asfáltico. Como consequência, também ocorre uma redução expressiva das emissões de gases de efeito estufa, expressas em equivalentes de dióxido de carbono (CO_2-eq), contribuindo para a redução da pegada de carbono da obra (MASCARENHAS *et al.*, 2023; SANTOLINI *et al.*, 2024).

Embora a matriz elétrica nacional seja composta majoritariamente por fontes renováveis, como a energia hidrelétrica e eólica, estudos de LCA demonstram que esse fator exerce pouca influência na redução dos impactos ambientais totais da mistura asfáltica (MASCARENHAS *et al*., 2023). A literatura evidencia que o desempenho ambiental na fase de usinagem é regido predominantemente pelo tipo de combustível utilizado para a secagem e o aquecimento dos materiais. No cenário brasileiro, o uso frequente de combustíveis fósseis altamente poluentes, como o óleo pesado, anula a vantagem da matriz elétrica limpa e resulta em emissões de gases de efeito estufa (GHG) e impactos à saúde humana superiores aos observados em usinas de países que empregam tecnologias mais eficientes e combustíveis menos emissores, como o gás metano (MASCARENHAS *et a*l., 2023).

Entretanto, a literatura destaca que os benefícios ambientais identificados pelo LCA dependem diretamente da durabilidade da mistura asfáltica produzida. Se a incorporação do material envelhecido resultar em um revestimento mais suscetível ao surgimento de trincas e outras patologias, a necessidade de manutenções antecipadas implicará novo consumo de materiais e combustível. Nesse cenário, as emissões adicionais podem reduzir ou até anular os ganhos ambientais obtidos na fase inicial de produção (MASCARENHAS *et al.*, 2023; SANTOLINI *et al.*, 2024).

Nesse contexto, métodos de dosagem baseados em desempenho, como o *Balanced Mix Design*, desempenham papel fundamental para a sustentabilidade da reciclagem asfáltica (VANGALA *et al.*, 2025). Ao equilibrar as propriedades mecânicas da mistura por meio de ensaios de deformação permanente e resistência à fratura, o método contribui para que o pavimento alcance a vida útil prevista sem falhas prematuras (LI *et al*., 2023; MONTAÑEZ *et al*., 2025). Dessa forma, preserva os benefícios ambientais identificados nas análises de ciclo de vida e reforça a viabilidade de pavimentos simultaneamente duráveis e sustentáveis (MASCARENHAS *et al*., 2023; SANTOLINI *et al*., 2024; VANGALA *et a*l., 2025).

3. METODOLOGIA

A pesquisa científica distingue-se de investigações informais pela adoção de procedimentos sistemáticos, capazes de garantir a confiabilidade e a validade dos resultados obtidos. Segundo Azevedo e Ensslin (2020), a metodologia da pesquisa compreende o estudo e a aplicação de métodos organizados, lógicos e estruturados para responder a um problema de pesquisa previamente definido. Nesse contexto, a definição de um percurso metodológico adequado constitui uma etapa fundamental para assegurar o rigor científico da investigação.

No campo da engenharia de pavimentos, a crescente complexidade dos estudos relacionados ao uso do RAP e à aplicação de metodologias baseadas em desempenho, como o BMD, exige análises fundamentadas em informações confiáveis e atualizadas. Dessa forma, torna-se necessário adotar procedimentos que permitam identificar, selecionar e analisar criticamente a produção científica disponível sobre o tema.

Além de orientar o desenvolvimento da pesquisa, a explicitação dos procedimentos metodológicos contribui para a transparência do estudo, permitindo que os resultados sejam compreendidos, avaliados e reproduzidos por outros pesquisadores (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020). Assim, este trabalho fundamenta-se em uma revisão sistemática da literatura, conduzida por meio de um processo estruturado de busca, seleção e análise de publicações científicas.

3.1. Enquadramento metodológico

A presente pesquisa classifica-se, quanto à sua natureza, como pesquisa básica. De acordo com Azevedo e Ensslin (2020), esse tipo de pesquisa tem como principal objetivo gerar conhecimentos que contribuam para o avanço da ciência, estabelecendo bases teóricas sem foco imediato em aplicações práticas. Nesse contexto, o presente estudo busca aprofundar a compreensão científica sobre a incorporação de elevados teores de RAP e a aplicação da metodologia BMD em misturas asfálticas a quente.

Quanto aos objetivos, a pesquisa caracteriza-se como exploratória. Esse tipo de investigação é utilizado para ampliar o conhecimento sobre determinado problema e explorar temas cujos entendimentos ainda estão em processo de consolidação pela comunidade científica (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020). Assim, o estudo analisa o estado da arte internacional com o objetivo de compreender como a engenharia rodoviária tem enfrentado as

limitações dos métodos volumétricos tradicionais diante dos desafios associados ao envelhecimento do ligante asfáltico e à elevada variabilidade física do material fresado.

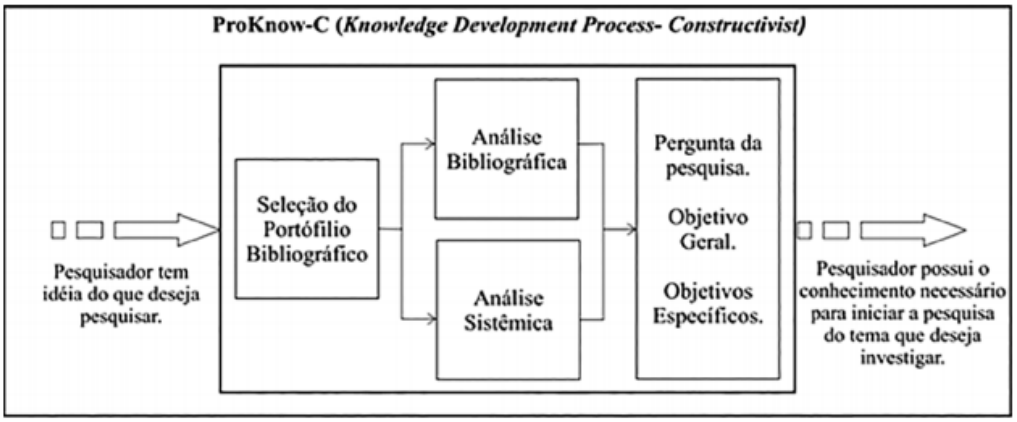
Em relação à abordagem metodológica, a pesquisa é classificada como quali-quantitativa, pois combina a análise de dados quantitativos e qualitativos. O estudo contempla a quantificação de informações bibliométricas e a avaliação de parâmetros numéricos relacionados a ensaios mecânicos de desempenho. Paralelamente, realiza a interpretação qualitativa de teorias sobre a interação química entre ligantes, métodos de processamento e fracionamento do RAP e diretrizes normativas relacionadas ao uso de materiais reciclados em pavimentação (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020).

3.2. O método *ProKnow-C*

A condução deste trabalho baseia-se no método *Knowledge Development Process – Constructivist (ProKnow-C)*. Desenvolvido pelo Laboratório de Metodologias Multicritério em Apoio à Decisão (LabMCDA), o *ProKnow-C* é um processo estruturado para a gestão da informação e para a construção do conhecimento a partir da literatura científica (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020).

A escolha desse método justifica-se pela sua capacidade de reduzir vieses durante a seleção e a análise dos estudos. Diferentemente das revisões não sistematizadas, o *ProKnow-C* exige a definição prévia das bases de dados, das palavras-chave, do recorte temporal e dos critérios de elegibilidade que orientarão a pesquisa (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020). Essa sistematização torna o processo mais transparente, rastreável e passível de reprodução por outros pesquisadores, contribuindo para a confiabilidade dos resultados obtidos (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020), cujas etapas estão ilustradas na figura 3.1.

Figura 3.1 - Fluxograma das etapas do processo de revisão sistemática de literatura segundo o método *ProKnow-C*.



Fonte: ENSSLIN, LEONARDO; ENSSLIN, SANDRA ROLIM *et al.* (2010).

Neste estudo, a aplicação do *ProKnow-C* foi organizada em três macroetapas. A primeira corresponde à seleção do portfólio bibliográfico, em que os artigos identificados nas bases de dados passam por sucessivas etapas de filtragem até a composição do conjunto final de trabalhos alinhados ao tema da pesquisa. A segunda etapa consiste na análise bibliométrica, responsável por identificar e quantificar aspectos relevantes da produção científica, como periódicos, autores, artigos e palavras-chave de destaque. A terceira etapa corresponde à análise sistêmica da literatura, na qual os estudos selecionados são examinados de forma qualitativa a partir de lentes de pesquisa previamente definidas, permitindo compreender o estado da arte e identificar lacunas de conhecimento relacionadas ao método *Balanced Mix Design* e ao uso de elevadas taxas de RAP (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020).

3.3. Definições da pesquisa e estratégia de busca

Para a condução desta revisão sistemática, a etapa de busca foi estruturada a partir do acesso a quatro bases de dados eletrônicas: *ScienceDirect, Scopus*, Portal de Periódicos da CAPES e *SciELO*. A seleção dessas plataformas justifica-se pela relevância e abrangência na indexação de periódicos de alto impacto na área de Engenharia Civil e Infraestrutura de Transportes. Além disso, essas bases disponibilizam recursos avançados para filtragem e cruzamento parametrizado de dados, requisitos essenciais para a aplicação do método *ProKnow-C* (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020).

A cronologia da pesquisa foi delimitada às publicações dos últimos dez anos, compreendendo o período de 2016 a 2026. Segundo Azevedo e Ensslin (2020), o recorte

temporal deve estar alinhado à evolução do conhecimento científico sobre o tema investigado. Dessa forma, a década selecionada contempla o desenvolvimento recente das pesquisas relacionadas ao controle da variabilidade de materiais reciclados e à consolidação dos protocolos da metodologia BMD. Adicionalmente, a busca foi restrita a documentos classificados como artigos científicos, publicados nos idiomas inglês e português.

A formulação das expressões de busca foi realizada por meio da combinação de palavras-chave, operadores booleanos (AND e OR) e do recurso de truncamento (*), utilizado para abranger diferentes variações de uma mesma raiz semântica e ampliar a abrangência dos resultados (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020). Com o objetivo de contemplar as diferentes lentes de pesquisa inicialmente definidas para o estudo — relacionadas ao desempenho mecânico, à sustentabilidade, e à normatização das misturas asfálticas recicladas —, foram elaboradas cinco estratégias de busca independentes. Essas estratégias foram aplicadas aos campos de título, resumo e palavras-chave das bases de dados selecionadas, conforme detalhado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Estratégias de busca utilizadas na pesquisa.

Foco da busca	String de pesquisa
Variabilidade e desempenho	*("Reclaimed Asphalt Pavement" OR "Asphalt RAP") AND (Variability OR Heterogeneity OR "Stockpile management") AND (Performance OR "Service life" OR "Pavement distress")*
Sustentabilidade abrangente	*("Reclaimed Asphalt Pavement") AND (Sustainability OR "Circular economy" OR "Environmental impact" OR "Carbon footprint" OR LCA) AND (Incorporation OR "Replacement ratio")*
Desempenho sustentável	*("Reclaimed Asphalt Pavement") AND (Sustainable OR Green) AND ("Mix design" OR "Recycling rate") AND (Performance OR Mechanical)*
Normatização e propriedades	*("Reclaimed Asphalt Pavement") AND (Standard* OR Specification* OR Protocol* OR "Quality control") AND (Characteri* OR Evaluation OR Properties)*
Processamento e consistência	*("Reclaimed Asphalt Pavement" OR RAP) AND (Homogeneity OR Uniformity OR Consistency OR Variability) AND (Processing OR Screening OR "Mix design")*

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A aplicação conjunta dessas estratégias permitiu delimitar de forma consistente o escopo da investigação e compor o conjunto inicial de publicações analisadas. Esse material constituiu a base de dados primária utilizada nas etapas subsequentes de elegibilidade e seleção do portfólio bibliográfico.

3.4. Critérios de elegibilidade e seleção do portfólio bibliográfico

A seleção do portfólio bibliográfico corresponde à etapa de filtragem estruturada do método, cujo objetivo é refinar o conjunto inicial de publicações retornadas pelas bases de dados e manter apenas os estudos alinhados ao problema de pesquisa (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020). A aplicação das estratégias de busca definidas na etapa anterior resultou em um conjunto inicial superior a 800 artigos científicos. Para viabilizar a análise desse material, o processo de seleção foi organizado em etapas sucessivas de elegibilidade.

A primeira etapa consistiu na leitura preliminar dos 800 resumos, realizada com o apoio de ferramentas computacionais para otimizar o processamento inicial das informações. Nessa fase, foram aplicados três critérios de inclusão previamente estabelecidos:

(1) estudos voltados à homogeneidade e ao desempenho mecânico, abordando a variabilidade do material fresado e os métodos de fracionamento;

(2) pesquisas relacionadas à sustentabilidade e à viabilidade ambiental da utilização de elevadas taxas de substituição; e

(3) trabalhos voltados à padronização e aos protocolos normativos, incluindo métodos de caracterização do ligante residual para garantir a segurança viária.

Após essa filtragem inicial, o conjunto foi reduzido para 67 artigos potencialmente relevantes. Na sequência, realizou-se o refinamento manual da amostra por meio da leitura criteriosa dos títulos, resumos e conclusões. O objetivo dessa etapa foi excluir estudos que, embora relacionados à área de pavimentação, não atendiam ao escopo específico desta pesquisa conforme Azevedo e Ensslin (2020) explicam. Foram excluídos os trabalhos que não abordavam misturas asfálticas a quente ou que não tratavam das metodologias de dosagem analisadas neste estudo. Dessa forma, permaneceram apenas os artigos que discutiam a comparação entre os métodos *Balanced Mix Design* e Marshall, o controle da variabilidade

dos materiais e o suporte à transição normativa para o método MeDiNa, totalizando 37 artigos.

A etapa seguinte envolveu a verificação do reconhecimento científico dos estudos selecionados. A relevância dos trabalhos foi avaliada por meio do levantamento do número de citações na literatura científica, utilizando a plataforma Google Acadêmico (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020). Foram identificados artigos amplamente consolidados, com quantitativos variando entre 191 e 240 citações. Paralelamente, o portfólio também incluiu estudos publicados em 2025 e 2026, que ainda não apresentavam volume significativo de citações em razão de sua recente publicação. A permanência desses trabalhos foi respaldada pela regra metodológica de resgate de artigos, que permite a inclusão de publicações com menos de dois anos de divulgação por representarem o estado mais recente do conhecimento científico, considerando que ainda não houve tempo suficiente para a consolidação de métricas de citação (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020).

Após a aplicação de todos os critérios de elegibilidade e a validação do reconhecimento científico, o portfólio final foi composto por 37 artigos. A tabela 3.2 apresenta a síntese quantitativa dos documentos em cada etapa do processo de seleção.

Tabela 3.2 - Síntese quantitativa do processo de seleção do portfólio bibliográfico.

Etapas do Processo	Quantidade de Artigos
Busca bruta nas bases de dados	> 800
Triagem computacional (leitura de resumos baseada em 3 critérios de inclusão)	67
Refinamento manual (leitura de títulos, resumos, conclusões e exclusão de temas fora do escopo)	37
Teste de reconhecimento científico (citações) e leitura integral	37

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Posteriormente, os 37 artigos remanescentes e selecionados foram submetidos à leitura integral e aprofundada, confirmando seu alinhamento com o tema investigado e fornecendo o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento das análises desta pesquisa.

3.5. Análise bibliométrica

A segunda macroetapa do método *ProKnow-C* corresponde à análise bibliométrica, definida como o processo de identificação e quantificação dos dados estatísticos extraídos do portfólio bibliográfico final. Essa etapa tem como objetivo organizar as informações e evidenciar a relevância acadêmica dos estudos selecionados, fornecendo uma visão quantitativa sobre o estágio de desenvolvimento do tema na literatura científica (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020).

Para a realização dessa etapa, os dados bibliográficos dos 37 artigos aprovados no processo de seleção foram extraídos e organizados com o auxílio de softwares gerenciadores de referências, como o *Mendeley*, e posteriormente estruturados em planilhas eletrônicas do Microsoft Excel (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020). O processo de tabulação contou ainda com o suporte de ferramentas de inteligência artificial para otimizar a extração de metadados relevantes, incluindo ano de publicação, autoria, título do artigo, periódico de publicação e palavras-chave recorrentes.

Com a base de dados organizada, foram elaborados gráficos e realizadas as análises das variáveis bibliométricas. Também foram analisados os periódicos com maior número de publicações na temática, os artigos de maior reconhecimento científico e os autores mais relevantes na produção de conhecimento sobre infraestrutura de transportes e pavimentação (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020).

Essa análise quantitativa permitiu caracterizar o perfil da produção científica relacionada ao tema investigado e forneceu a base necessária para a etapa seguinte da pesquisa, voltada à análise qualitativa e sistêmica da literatura.

3.6. Análise sistêmica da literatura

A terceira e última macroetapa do método *ProKnow-C* corresponde à análise sistêmica da literatura, definida como um processo estruturado de investigação que avalia um conjunto de artigos com base em uma filiação teórica previamente estabelecida pelo pesquisador (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020). O principal objetivo dessa etapa é analisar qualitativamente o portfólio bibliográfico, identificando contribuições relevantes, limitações e oportunidades de avanço científico presentes no estado da arte.

Para conduzir essa análise, o método recomenda a definição de lentes de pesquisa, que funcionam como direcionadores da leitura e da interpretação dos estudos selecionados (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020). Essas lentes orientam a extração e a organização das informações, permitindo identificar lacunas de conhecimento, diferentes abordagens metodológicas e resultados que podem ser comparados tecnicamente. Dessa forma, fornecem a base necessária para o desenvolvimento crítico da pesquisa.

Essa abordagem possibilitou identificar convergências e divergências entre os trabalhos analisados, comparar os resultados obtidos por métodos tradicionais de dosagem, como o método Marshall, com aqueles fundamentados em desempenho mecânico, como o BMD, além de evidenciar lacunas normativas relacionadas à pavimentação asfáltica no contexto nacional. Essas análises serviram de base para as discussões e reflexões desenvolvidas ao longo deste trabalho.

4. ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS

Este capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos nesta pesquisa. A discussão foi estruturada a partir dos principais fatores que influenciam a incorporação de elevados teores de RAP em misturas asfálticas a quente, com foco nos desafios associados à variabilidade do material, à interação entre ligantes, ao desempenho mecânico das misturas e às implicações para a sustentabilidade da pavimentação.

A análise busca compreender como esses fatores se relacionam e de que forma podem influenciar a viabilidade da utilização de altos teores de RAP. Nesse contexto, são discutidas as contribuições da metodologia *Balanced Mix Design* para o equilíbrio entre resistência à deformação permanente e ao trincamento, bem como seu potencial para apoiar a evolução das práticas de dosagem e dimensionamento de pavimentos.

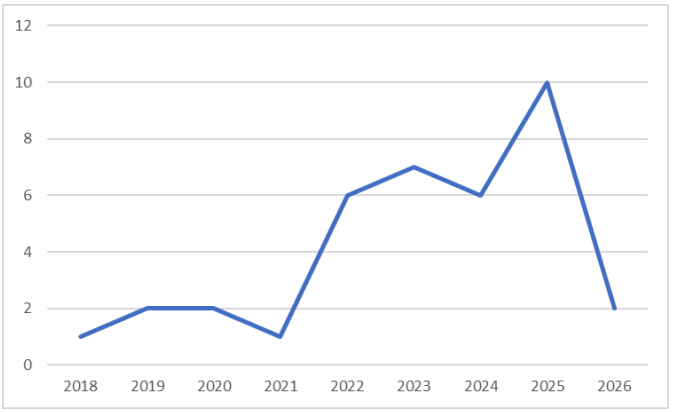
As seções seguintes apresentam os resultados e as discussões organizados em eixos temáticos, permitindo avaliar as evidências disponíveis na literatura e responder ao problema de pesquisa proposto.

4.1. Resultados da análise bibliométrica

A análise bibliométrica permitiu caracterizar quantitativamente o portfólio bibliográfico selecionado e verificar a relevância acadêmica das fontes que fundamentam esta pesquisa. Essa etapa tem como objetivo organizar e evidenciar informações estatísticas sobre a produção científica relacionada ao tema, contribuindo para a compreensão do cenário atual das pesquisas sobre RAP e métodos de dosagem baseados em desempenho.

A distribuição temporal das publicações demonstra que a incorporação de elevados teores de RAP e o desenvolvimento de metodologias orientadas ao desempenho constituem temas de crescente interesse na comunidade científica. Todos os artigos do portfólio foram publicados na última década, com maior concentração de estudos nos últimos cinco anos. Esse resultado evidencia que a busca por alternativas aos métodos volumétricos tradicionais permanece como uma discussão atual e em constante evolução, conforme ilustra a distribuição apresentada no gráfico 4.1.

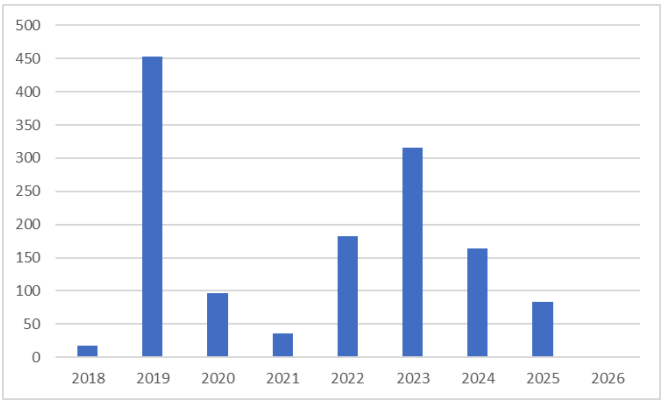
Gráfico 4.1 - Distribuição temporal das publicações do portfólio bibliográfico (2016–2026).



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Em relação aos periódicos, observa-se predominância de revistas internacionais de reconhecida relevância nas áreas de Engenharia Civil, Materiais e Sustentabilidade. Grande parte dos estudos sobre o BMD e variabilidade do RAP encontra-se publicada em periódicos especializados, o que reforça a qualidade científica das evidências utilizadas nesta pesquisa. Além disso, a concentração das publicações em revistas de referência indica que o tema tem recebido atenção significativa da comunidade acadêmica voltada à infraestrutura de transportes e à pavimentação. A análise do reconhecimento científico dos artigos também reforça a consistência do portfólio. A amostra reúne estudos amplamente citados na literatura e pesquisas mais recentes, que representam o avanço atual do conhecimento sobre reciclagem de pavimentos, *blending*, rejuvenescedores e dosagens baseadas em desempenho, como evidenciado no gráfico 4.2.

Gráfico 4.2 - Relevância dos periódicos no portfólio bibliográfico.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

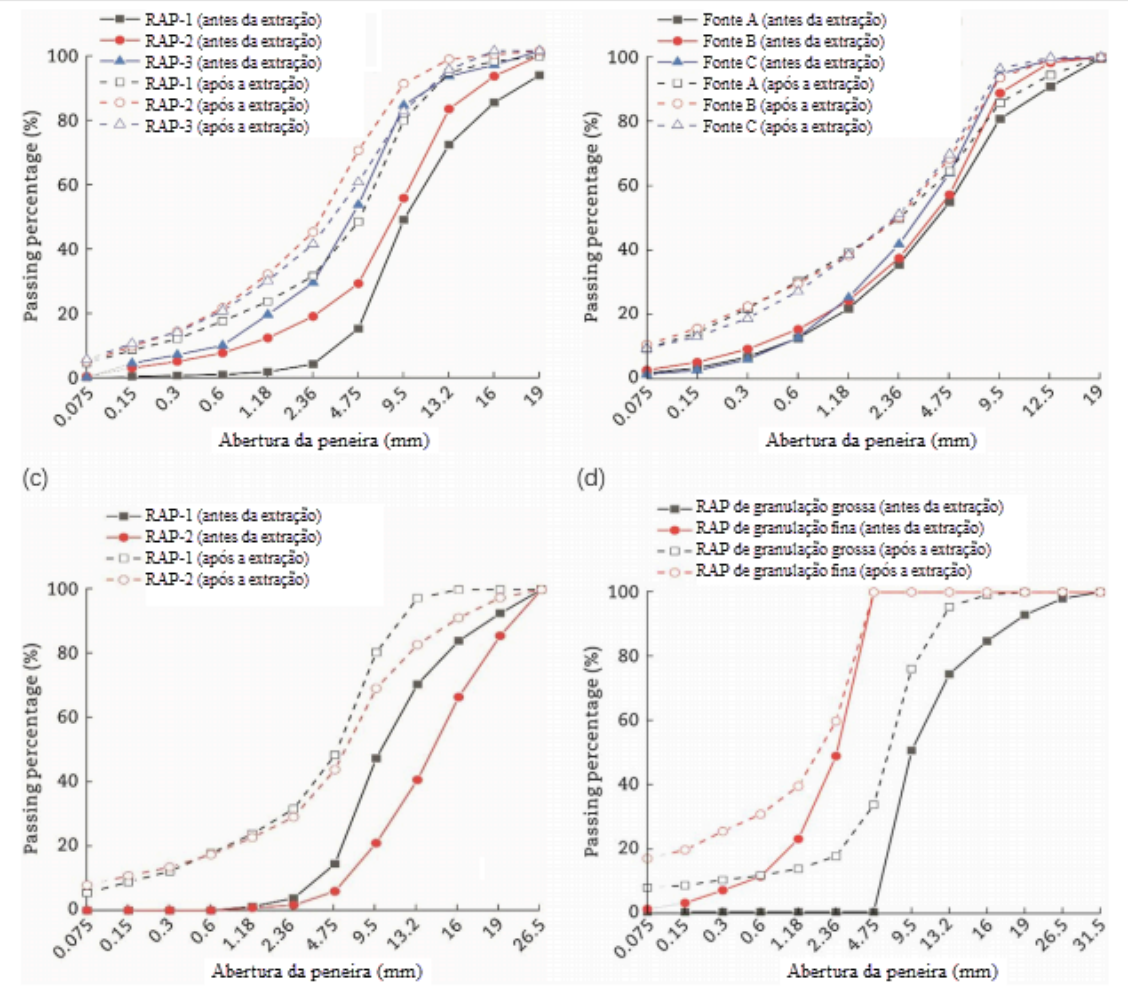
Por fim, a avaliação das palavras-chave mais recorrentes confirmou o alinhamento do portfólio com os objetivos da pesquisa. Termos como *reclaimed asphalt pavement*, *balanced mix design*, *blending*, *rejuvenators* e *variability* aparecem com elevada frequência entre os estudos selecionados. Esse resultado demonstra que as publicações analisadas abordam diretamente os principais fatores que condicionam a utilização de elevados teores de RAP em misturas asfálticas. Além disso, essas temáticas definem os eixos de discussão que serão analisados criticamente nas seções seguintes.

4.2. Impacto da variabilidade física e a eficiência do fracionamento refinado

Como exposto no capítulo 2, a principal causa dessa variabilidade está associada ao fenômeno de aglomeração (*clustering*), como consequência, o RAP deixa de se comportar como um conjunto de agregados limpos e individualizados. E a análise dos estudos selecionados demonstra que a presença dessas partículas aglomeradas provoca distorções significativas em parâmetros volumétricos importantes para a dosagem, como os Vazios no Agregado Mineral (VMA) (AI *et al*., 2025). Esse efeito pode ser observado na figura 4.1, que apresenta a diferença entre a curva granulométrica aparente do material fresado e a curva granulométrica real dos agregados após a extração do ligante (AI *et al*., 2025).

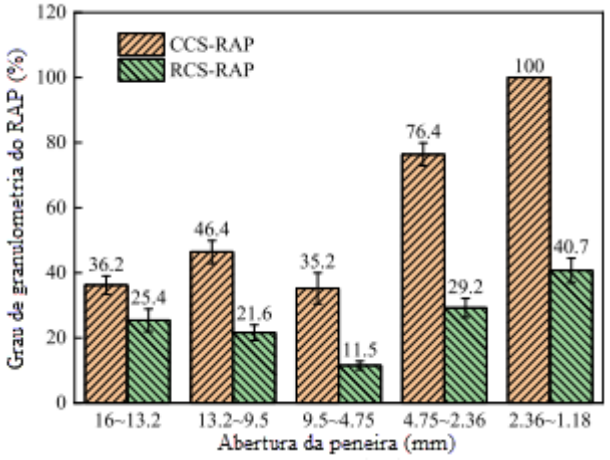
Para reduzir essa variabilidade em misturas com altos teores de RAP, a literatura aponta a superioridade do processo de Britagem e Peneiramento Refinados (RCS) em relação ao processamento Convencional (CCS) (LI *et al.,* 2024). Esse método promove uma desagregação mais eficiente dos *clusters* e uma separação mais adequada das diferentes frações granulométricas. Como resultado, ocorre uma redução significativa da taxa de aglomeração em todas as faixas de tamanho de partículas, conforme mostrado na figura 4.2 (LI *et a*l., 2024).

Figura 4.1 - Diferença entre as curvas granulométricas das partículas de RAP antes e após a extração do ligante.



Fonte: Adaptado de AIi *et al.* (2025) , com base em Zhu *et al.* (2020), Abdalfattah *et al.* (2021), Xu *et al.* (2019) e Chen *et al.* (2021).

Figura 4.2 - Comparação do grau de aglomeração do RAP processado por britagem convencional (CCS) e por britagem refinada (RCS).



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

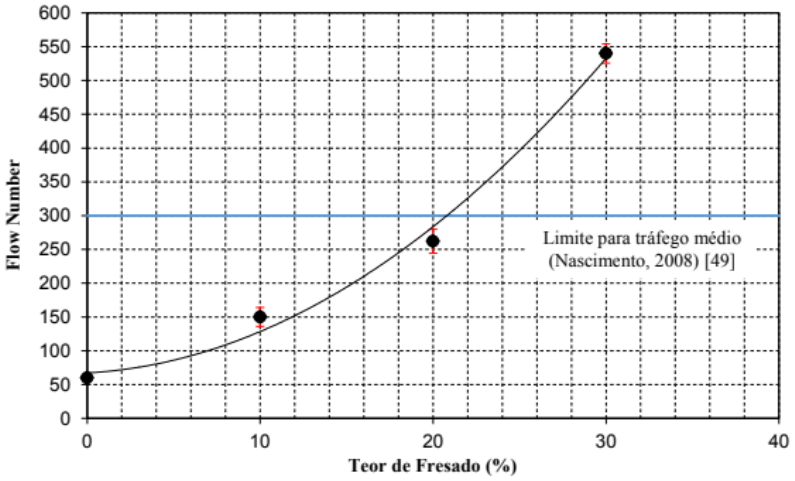
Como consequência desse processamento, as frações graúdas do RAP passam a apresentar comportamento volumétrico e mecânico mais uniforme e próximo ao dos agregados virgens (LI *et a*l., 2024; WANG *et al.*, 2023). Isso aumenta a previsibilidade da mistura asfáltica e facilita a avaliação dos efeitos associados ao ligante envelhecido. Dessa forma, os impactos da rigidez do ligante podem ser analisados e controlados com maior precisão durante o processo de dosagem (LI *et al*., 2024).

4.3. O paradoxo do envelhecimento: ganho de estabilidade vs. suscetibilidade ao trincamento

Superado o desafio da variabilidade física dos agregados, a incorporação de elevados teores de RAP adiciona à mistura uma quantidade significativa de ligante envelhecido. Esse material exerce efeitos opostos sobre o desempenho mecânico e dá origem ao chamado paradoxo do envelhecimento, amplamente discutido na literatura (ANTUNES *et al.*, 2019; YU *et al.*, 2024).

Em altas temperaturas e sob carregamentos contínuos, a maior rigidez do ligante residual contribui para o aumento da estabilidade da mistura asfáltica (CENTOFANTE *et al.*, 2018; YU *et al.*, 2024). Os resultados de ensaios de *Flow Number* (FN), realizados a 60 °C, mostram que a resistência à fluência terciária aumenta com a elevação do teor de RAP. Em estudo conduzido por Centofante *et al.* (2018), a mistura de referência sem RAP apresentou falha em aproximadamente 60 ciclos. Com a incorporação de 10%, 20% e 30% de RAP, esse valor aumentou para 150, 262 e 540 ciclos, respectivamente. Esses resultados evidenciam ganhos expressivos na resistência à deformação permanente, conforme apresentado na figura 4.3.

Figura 4.3 - Resultado do ensaio de *Flow Number* (FN) em função do teor de material fresado na mistura.



Fonte: CENTOFANTE *et al.* (2018).

Por outro lado, os mesmos mecanismos responsáveis pelo aumento da estabilidade tornam a mistura mais suscetível ao trincamento térmico e ao trincamento por fadiga (ANTUNES *et al.*, 2019; YU *et al.*, 2024). Essa perda de desempenho pode ser avaliada por meio de ensaios de fratura, como o *Semi-Circular Bending* (SCB) e o *Indirect Tensile Asphalt Cracking Test* (IDEAL-CT). Os estudos indicam que o aumento do teor de RAP e da participação do ligante envelhecido reduz significativamente a Energia de Fratura e o Índice de Flexibilidade (FI) das misturas (YU *et al.*, 2024).

Diante desse cenário, torna-se evidente que a utilização segura de altas taxas de RAP não pode ser baseada apenas em parâmetros volumétricos. O desafio consiste em restaurar parte da capacidade de relaxamento do ligante oxidado sem eliminar os benefícios associados à sua maior rigidez. Além disso, torna-se necessária a adoção de metodologias de dosagem capazes de equilibrar os mecanismos de resistência ao afundamento e ao trincamento, garantindo que o ganho em uma propriedade não resulte na deterioração da outra.

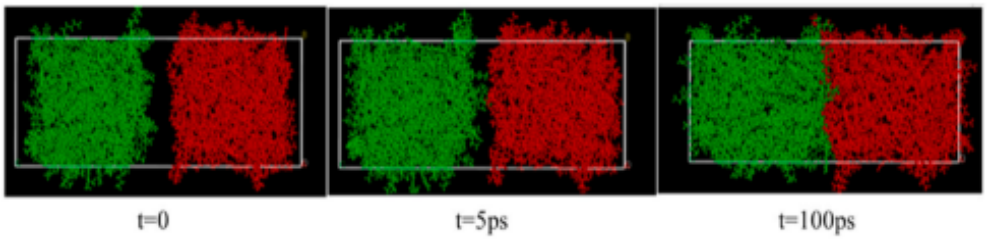
4.4. Desafios químicos: a dinâmica de *Blending* e a ação dos rejuvenescedores

A redução da variabilidade física do RAP e o controle dos efeitos do envelhecimento do ligante são etapas fundamentais para viabilizar a produção de misturas recicladas. Entretanto, os estudos analisados mostram que o desempenho final da mistura depende diretamente da eficiência da interação entre o ligante residual presente no RAP e o ligante virgem.

Como a disponibilidade do ligante envelhecido é apenas parcial, erros na estimativa desse fenômeno podem resultar em misturas com deficiência de ligante efetivo. Nesses casos, a mistura tende a apresentar filmes asfálticos mais finos e uma matriz excessivamente seca, aumentando a suscetibilidade ao dano por umidade e favorecendo a ocorrência de falhas prematuras por fadiga (MA *et al*., 2022; XING *et al*., 2023).

Para aumentar a mobilidade do ligante envelhecido e melhorar a interação entre os ligantes, a utilização de agentes rejuvenescedores tem se mostrado uma alternativa importante (KASEER *et al*., 2019; YU *et al*., 2024). A eficácia dessa intervenção química tem sido demonstrada por meio de simulações de Dinâmica Molecular (MD). Conforme apresentado na figura 4.4, os modelos computacionais indicam que a presença desses agentes aumenta significativamente a taxa de difusão entre as moléculas do ligante virgem e as camadas de ligante envelhecido ao longo do tempo (ZHANG *et al*., 2024).

Figura 4.4 - Simulação por dinâmica molecular do processo de difusão entre ligantes virgem e envelhecido ao longo do tempo.



Fonte: Zhang *et al.* (2024).

Ao favorecer o reequilíbrio das propriedades do ligante envelhecido, esses aditivos contribuem para a recuperação da flexibilidade da mistura e para o aumento da resistência à propagação de trincas. No entanto, a literatura destaca que dosagens excessivas podem provocar o superamolecimento da mistura, reduzindo os benefícios da rigidez proporcionada pelo RAP e aumentando a suscetibilidade à deformação permanente (KASEER *et al*., 2019).

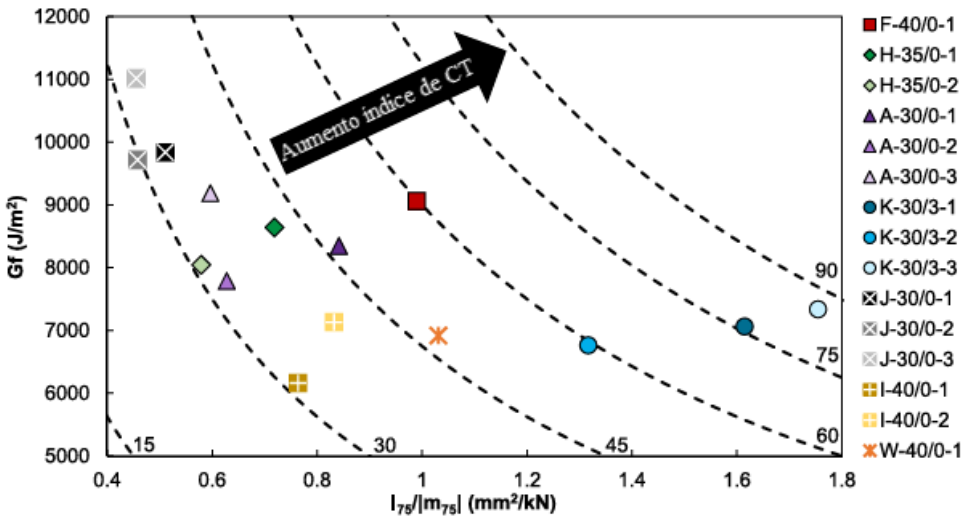
Dessa forma, a análise do fenômeno de *blending* evidencia um conflito entre propriedades mecânicas desejáveis. As intervenções químicas necessárias para reduzir o risco de trincamento podem, simultaneamente, diminuir a resistência ao afundamento. Esse comportamento reforça as limitações dos métodos de dosagem baseados apenas em parâmetros volumétricos e evidencia a necessidade de metodologias fundamentadas em ensaios de desempenho, capazes de controlar simultaneamente os riscos de *rutting* e *cracking* em misturas com altos teores de RAP.

4.5. A metodologia BMD como ferramenta de equilíbrio mecânico

A variabilidade física do agregado fresado e as incertezas associadas à taxa efetiva de mistura química, discutidas nas seções anteriores, impõem limitações importantes aos métodos convencionais de dosagem. Para superar essas dificuldades e reduzir o risco de falhas estruturais prematuras em campo, a metodologia BMD utiliza um processo iterativo de calibração da mistura. Nesse processo, alterações na formulação — como a variação do teor de RAP, ajustes granulométricos ou modificações na dosagem de ligantes e agentes rejuvenescedores — são avaliadas por meio do Diagrama de Espaço de Desempenho (PSD), permitindo deslocar o comportamento da mistura até uma faixa de desempenho equilibrado.

Na avaliação do trincamento, considerado um dos principais desafios das misturas com elevados teores de ligante envelhecido, os protocolos BMD empregam ensaios específicos de fratura. Entre eles, destaca-se o *Indirect Tensile Asphalt Cracking Test* (IDEAL-CT), utilizado para determinar o Índice de Tolerância ao Trincamento (CTIndex). A literatura demonstra que o desempenho da mistura nesse ensaio está diretamente relacionado à interação entre sua tenacidade e sua ductilidade, conforme ilustrado no diagrama apresentado na figura 4.5.

Figura 4.5 - Diagrama de interação do ensaio IDEAL-CT correlacionando a energia de fratura (*Gf*) e a inclinação pós-pico na determinação do Índice de Tolerância ao Trincamento (*CTIndex*).



Fonte: Adaptado de DUARTE *et al.* (2026).

Os resultados experimentais mostram que misturas com composições distintas podem atingir o mesmo valor de CTIndex, desde que exista um equilíbrio adequado entre a energia

de fratura (Gf) e a capacidade de deformação antes da propagação da trinca, representada pela inclinação pós-pico (DUARTE *et al.*, 2026). Essa abordagem evidencia que o BMD transfere a validação da mistura dos parâmetros volumétricos para a avaliação direta do desempenho mecânico.

Dessa forma, a metodologia BMD apresenta-se como uma ferramenta eficaz para lidar com o paradoxo do envelhecimento associado ao RAP. Ao adotar critérios baseados na resposta mecânica dos materiais, o método contribui para superar a limitação histórica que restringia a incorporação de RAP a teores entre 20% e 25%. A utilização de uma abordagem orientada ao desempenho possibilita o desenvolvimento de pavimentos mais seguros, duráveis e aptos à incorporação de elevadas taxas de materiais reciclados.

A literatura demonstra que as exigências de desempenho de uma mistura asfáltica devem ser compatíveis com o volume de tráfego ao qual o pavimento será submetido. A metodologia *Balanced Mix Design* considera essa condição ao estabelecer diferentes critérios de aprovação para tráfego leve, médio e pesado por meio dos Diagramas de Espaço de Desempenho (PSD). Dessa forma, a validação laboratorial deixa de seguir um critério único e passa a ser ajustada conforme as condições reais de serviço da via (LI *et al*., 2023).

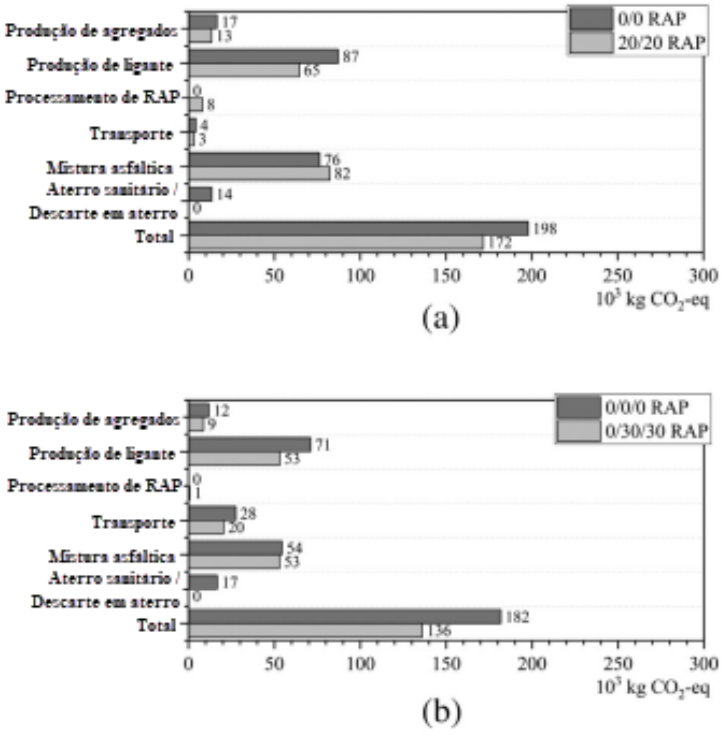
Rodovias de baixo volume de tráfego estão sujeitas a menores solicitações estruturais e, por isso, exigem menor resistência à deformação permanente. Como a incorporação de elevados teores de RAP aumenta naturalmente a rigidez da mistura e melhora sua resistência ao afundamento em trilha de roda, essas vias tornam-se cenários favoráveis para a utilização de maiores percentuais de material reciclado. Nesses casos, os critérios mecânicos podem ser ajustados de forma segura, permitindo ampliar o teor de RAP sem aumentar o risco de falhas prematuras (MAGAR *et al*., 2022).

Os estudos analisados mostram que, quando os parâmetros de dosagem são definidos de acordo com a classe de tráfego, é possível utilizar misturas contendo entre 40% e 100% de RAP em camadas de rolamento de vias com baixo volume de tráfego. Assim, o BMD se consolida como uma metodologia flexível, capaz de orientar a aplicação de misturas com elevadas taxas de reciclagem em rodovias secundárias e vias urbanas de menor fluxo. Essa estratégia otimiza o aproveitamento do material reciclado, amplia os benefícios ambientais e econômicos e preserva o desempenho das rodovias submetidas a maiores níveis de solicitação (MAGAR *et al*., 2022; LI *et al*., 2023).

4.6. Sustentabilidade da incorporação de elevados teores de RAP

Após a validação mecânica proporcionada pela metodologia BMD, a incorporação de elevados teores de RAP consolida-se como uma estratégia eficaz para reduzir os impactos ambientais da infraestrutura de transportes. Sob a perspectiva do ciclo de vida, a produção de misturas asfálticas convencionais apresenta elevada intensidade de carbono. Embora o ligante asfáltico represente apenas cerca de 5% da massa total da mistura, sua extração, refino e transporte são responsáveis por aproximadamente 87% da Demanda Cumulativa de Energia (CED) não renovável (MASCARENHAS *et al*., 2023). Nesse contexto, o reaproveitamento do ligante envelhecido permite substituir parte do cimento asfáltico de petróleo (CAP) virgem, reduzindo significativamente os impactos associados à obtenção de matérias-primas, conforme apresentado na figura 4.6.

Figura 4.6 - Comparativo das emissões de gases de efeito estufa (GHG) entre misturas asfálticas convencionais (0% RAP) e com incorporação de material fresado no cenário brasileiro.



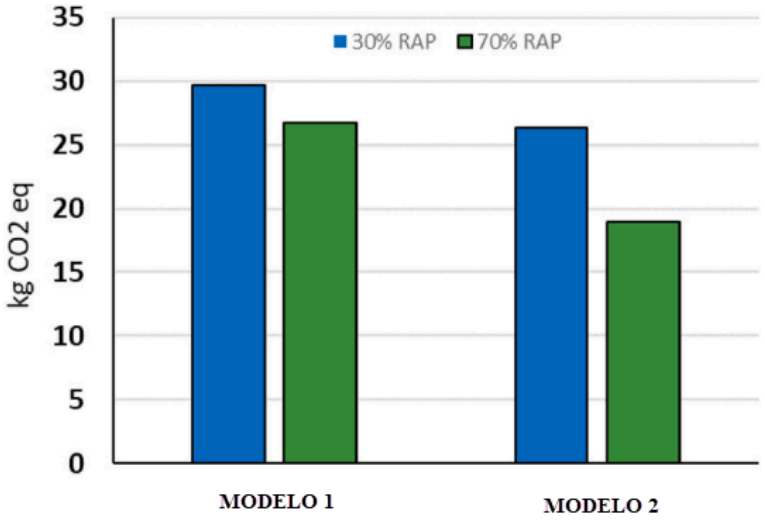
Fonte: Adaptado de MASCARENHAS *et al.* (2023).

Estudos desenvolvidos para a realidade brasileira mostram que a substituição de materiais virgens por teores de até 20% de RAP pode reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GHG) em 13%. Esse resultado decorre tanto da diminuição do consumo de CAP quanto da redução da destinação de resíduos a aterros industriais (MASCARENHAS *et al*.,

2023). Além disso, quando o controle da variabilidade permite elevar o teor de incorporação para 32%, as emissões de dióxido de carbono (CO_2) ao longo de 20 anos podem ser reduzidas em até 8,59% em comparação com misturas contendo menores teores de RAP (XU *et al*., 2025).

Os benefícios ambientais tornam-se ainda mais expressivos com o aumento da taxa de reciclagem. Comparações entre misturas contendo 30% e 70% de RAP indicam reduções contínuas no Potencial de Aquecimento Global (GWP), além de quedas superiores a 83% na escassez de recursos minerais. Também são observadas reduções significativas nos indicadores de ecotoxicidade terrestre e consumo de água doce, devido à menor necessidade de exploração de jazidas e atividades de pedreira (SANTOLINI *et al*., 2024). A figura 4.7 apresenta os resultados relacionados ao GWP.

Figura 4.7 - Resultados do Potencial de Aquecimento Global (GWP) para a produção de misturas asfálticas contendo 30% e 70% de RAP.



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

Entretanto, a literatura destaca que os ganhos ambientais dependem diretamente da durabilidade do pavimento em serviço, tornando indispensável a adoção de metodologias de dosagem orientadas ao desempenho, como o BMD. Estudos mostram que o aumento do teor de RAP de 30% para 40% pode reduzir a pegada de carbono entre 4% e 11%, desde que a mistura apresente desempenho mecânico adequado e não demande intervenções prematuras ao longo de sua vida útil (VANGALA *et al*., 2025).

Sob o ponto de vista econômico, a Análise do Custo do Ciclo de Vida (LCC) demonstra que o aumento do teor de RAP reduz progressivamente o custo de produção por tonelada de mistura asfáltica (SANTOLINI *et al*., 2024). Em conjunto, as evidências técnicas, ambientais e econômicas demonstram o potencial da reciclagem em altas taxas. No entanto, sua consolidação no Brasil depende da atualização dos marcos regulatórios e da incorporação de critérios modernos de desempenho aos procedimentos nacionais de projeto.

4.7. Perspectivas para a implementação do BMD e integração com o MeDiNa no Brasil

A análise das evidências apresentadas na literatura demonstra que a transição para o Método Mecanístico-Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos (MeDiNa) exige uma avaliação rigorosa da resistência à deformação permanente e ao trincamento por fadiga (MASCARENHAS *et al*., 2023). Nesse contexto, estudos nacionais mostram que a metodologia BMD é compatível com as exigências deste método, principalmente por validar misturas recicladas por meio do ensaio uniaxial de carga repetida para determinação do *Flow Number* (CENTOFANTE *et al*., 2018; MONTEIRO *et al*., 2023).

De acordo com os critérios adotados pelo MeDiNa, são exigidos valores mínimos de 300 ciclos de FN para tráfego médio e 750 ciclos para tráfego pesado. Os estudos analisados mostram que misturas contendo entre 30% e 100% de RAP podem atingir ou até superar esses limites quando são projetadas com base em ensaios mecânicos de desempenho. Esses resultados demonstram que misturas com elevados teores de ligante envelhecido podem apresentar comportamento estrutural adequado quando sua avaliação não se limita aos parâmetros da dosagem volumétrica (CENTOFANTE *et al*., 2018; MONTEIRO *et al*., 2023).

Apesar desses avanços, a integração entre a reciclagem em altas taxas e o dimensionamento mecanístico ainda enfrenta desafios normativos e operacionais no Brasil. A implementação da metodologia BMD e a transição para critérios baseados em desempenho exigem investimentos em infraestrutura laboratorial e adaptações nas usinas de produção.

No ambiente laboratorial, o custo depende diretamente dos ensaios adotados. Ensaios de trincamento, como o IDEAL-CT, exigem equipamentos de baixo custo, com investimento inferior a US$ 10.000. Em contrapartida, simuladores de deformação permanente, como o *Hamburg Wheel Tracking Test* (HWTT), demandam investimentos mais elevados, geralmente superiores a US$ 50.000 (LI *et al*., 2023).

Além da modernização dos laboratórios, as construtoras e usinas precisam adaptar sua infraestrutura para reduzir a variabilidade do RAP. Essas adequações incluem a instalação de tanques adicionais com sistemas de aquecimento para armazenamento e dosagem de agentes rejuvenescedores, além da organização do pátio para o peneiramento, fracionamento e estocagem das diferentes frações do material fresado (ANTUNES *et al*., 2019).

Embora essas adaptações representem um investimento inicial, a literatura demonstra que a transição é economicamente viável. A aplicação da metodologia BMD permite o uso seguro de elevados teores de RAP, reduzindo entre 15% e 70% o custo de produção por tonelada de mistura asfáltica. Essa economia resulta principalmente da substituição de agregados e ligantes virgens, compensando rapidamente os investimentos realizados na infraestrutura das usinas (KASEER *et al*., 2019; ANTUNES *et al*., 2019).

Para os laboratórios brasileiros, uma alternativa de menor custo consiste na adaptação dos equipamentos já disponíveis. A literatura ressalta que os parâmetros empíricos do ensaio Marshall não podem ser utilizados para representar o desempenho mecânico da mistura, pois o índice de estabilidade não distingue adequadamente sua rigidez nem sua capacidade de deformação. Entretanto, a própria prensa Marshall pode ser adaptada para a realização de ensaios do BMD. O ensaio IDEAL-CT, por exemplo, aplica uma carga diametral em corpos de prova cilíndricos à velocidade constante de 50 mm/min, exatamente a mesma velocidade utilizada no ensaio Marshall convencional (YU *et al*., 2024).

Essa adaptação requer apenas a instalação de um sistema de aquisição de dados composto por células de carga, transdutores de deslocamento (LVDT) e um *software* capaz de registrar continuamente a curva carga-deslocamento. Como o IDEAL-CT dispensa cortes complexos e colagens nos corpos de prova, essa solução torna a implementação do BMD uma alternativa prática, eficiente e financeiramente acessível para os laboratórios brasileiros (YU *et al*., 2024; LI *et al*., 2023).

Além dos investimentos em infraestrutura, a literatura reforça que o RAP apresenta elevada variabilidade física e química. Quando essa variabilidade não é controlada por técnicas de fracionamento refinado e pela dosagem adequada de agentes rejuvenescedores, podem surgir inconsistências incompatíveis com o nível de precisão exigido pelo dimensionamento mecanístico. Dessa forma, a ampliação da reciclagem em altas taxas depende da padronização dos processos de beneficiamento, usinagem e dosagem do material.

Nesse cenário, o BMD destaca-se como a metodologia capaz de integrar as exigências do desempenho mecânico às necessidades da reciclagem asfáltica. Ao exigir a comprovação laboratorial da resistência ao trincamento e à deformação permanente antes da aplicação em campo, o método fornece a confiabilidade necessária para atender aos critérios do MeDiNa. Assim, sua adoção pode ampliar o uso de RAP nas rodovias brasileiras e contribuir para o desenvolvimento de uma infraestrutura mais sustentável, durável e eficiente (MONTEIRO *et al*., 2023).

5. CONCLUSÕES

A presente pesquisa teve como objetivo analisar os desafios técnicos associados à incorporação de elevados teores de Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP) em novas misturas asfálticas e identificar metodologias capazes de garantir seu desempenho estrutural e sua viabilidade ambiental. A análise do estado da arte confirmou a hipótese central do trabalho: a adoção da metodologia *Balanced Mix Design*, associada ao controle da variabilidade do material e ao uso adequado de agentes rejuvenescedores, viabiliza a reciclagem segura em altas taxas.

A revisão bibliográfica demonstra que os métodos de dosagem tradicionalmente utilizados, como o Marshall e o Superpave volumétrico, apresentam limitações ao assumirem a premissa de mistura total entre os ligantes e basearem o projeto, principalmente, em parâmetros volumétricos (SHARMA *et al*., 2022; YU *et al*., 2024). Em contrapartida, o BMD supera essas limitações ao direcionar o projeto para o desempenho mecânico da mistura, definindo o teor ótimo de ligante a partir do equilíbrio entre a resistência ao trincamento e à deformação permanente (LI *et al*., 2023).

No contexto da realidade brasileira, os estudos indicam que a transição para o BMD é tecnicamente viável. O ensaio de trincamento IDEAL-CT, amplamente empregado nessa metodologia, utiliza a mesma velocidade de carregamento adotada pela prensa Marshall convencional (YU *et al*., 2024). Dessa forma, a modernização dos laboratórios pode ser realizada por meio da adaptação dos equipamentos já existentes, com a incorporação de sistemas de aquisição de dados, dispensando a substituição completa do maquinário.

Sob os aspectos operacional e econômico, a literatura mostra que a implementação do BMD exige investimentos iniciais em infraestrutura, incluindo equipamentos para ensaios mecânicos — inferiores a US$ 10.000 — e adequações em tanques e pátios das usinas para o armazenamento de agentes rejuvenescedores e do RAP fracionado (ANTUNES *et al*., 2019; LI *et al*., 2023). Apesar desse investimento inicial, os estudos demonstram elevada viabilidade econômica da transição. O uso seguro de misturas contendo entre 30% e 40% de RAP pode reduzir os custos de produção entre 15% e 70%, principalmente pela substituição de agregados e ligantes virgens, compensando rapidamente os investimentos realizados (KASEER *et al*., 2019; MONTAÑEZ *et al*., 2025).

Em relação ao comportamento físico e químico dos materiais, os estudos evidenciam que a interação entre o ligante envelhecido e o ligante virgem ocorre apenas de forma parcial (PINHEIRO *et al*., 2022). Além disso, a elevada variabilidade física do RAP reforça a necessidade do uso de técnicas de fracionamento refinado para romper aglomerados e estabilizar a granulometria da mistura (XU *et al*., 2025; WANG *et al*., 2023). Paralelamente, a utilização criteriosa de agentes rejuvenescedores é essencial para recuperar a flexibilidade do ligante envelhecido sem comprometer a resistência à deformação permanente.

Por fim, a superação desses desafios técnicos potencializa os benefícios ambientais da reciclagem asfáltica, reduzindo o consumo de energia não renovável e as emissões de gases de efeito estufa em comparação às misturas convencionais (MASCARENHAS *et al*., 2023; SANTOLINI *et al*., 2024).

Diante do processo de modernização da infraestrutura rodoviária brasileira, conclui-se que a viabilização de misturas com elevados teores de RAP depende da integração entre o controle da variabilidade física do material, o gerenciamento das interações químicas entre os ligantes e a metodologia BMD. Essa integração é compatível com os princípios do dimensionamento mecanístico-empírico adotado pelo MeDiNa e representa um caminho promissor para ampliar o uso seguro e sustentável do material fresado na malha rodoviária brasileira.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

A constante evolução das tecnologias voltadas à reciclagem de pavimentos asfálticos amplia as possibilidades para novas investigações científicas (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020). Com base nas lacunas identificadas ao longo desta revisão sistemática da literatura, são apresentadas as seguintes sugestões para trabalhos futuros.

A primeira refere-se à validação em escala real das misturas com elevados teores de RAP no contexto brasileiro. Recomenda-se a construção e o monitoramento de trechos experimentais utilizando misturas asfálticas com teores superiores a 40% de RAP, dosadas pela metodologia *Balanced Mix Design*. Essa abordagem permitiria comparar os resultados obtidos em laboratório com o desempenho observado em campo, considerando as condições climáticas, as solicitações de tráfego e os critérios de dimensionamento adotados pelo método MeDiNa.

Outra oportunidade de pesquisa consiste no aprimoramento dos protocolos de extração e caracterização do ligante residual. Sugere-se o desenvolvimento de estudos voltados à padronização dos métodos de extração química, bem como à avaliação de solventes alternativos e técnicas não destrutivas. Essas investigações podem contribuir para uma análise reológica mais precisa do ligante recuperado, reduzindo os efeitos causados por resíduos de solventes ou pelo envelhecimento térmico secundário durante o processo de recuperação.

Adicionalmente, sugere-se a condução de investigações experimentais voltadas à avaliação de diferentes categorias de agentes rejuvenescedores, com especial enfoque nos aditivos de base biológica, como óleos vegetais e resíduos orgânicos. Trabalhos futuros podem quantificar e comparar a eficiência desses materiais sustentáveis frente aos rejuvenescedores tradicionais de base petrolífera, analisando sua capacidade de restaurar a reologia do ligante envelhecido e promover o *blending* efetivo em misturas asfálticas recicladas usinadas no Brasil.

Por fim, recomenda-se a realização de estudos integrando a Avaliação do Ciclo de Vida e a Análise do Custo do Ciclo de Vida aplicadas à realidade da infraestrutura rodoviária brasileira. Essas pesquisas podem quantificar a viabilidade econômica da implantação de tecnologias de fracionamento refinado em usinas de asfalto, considerando os investimentos necessários e os benefícios obtidos pela redução do consumo de materiais virgens ao longo da vida útil do pavimento.

6. REFERÊNCIAS

AI, X. et al. RAP agglomeration and partial blending of recycled hot mix asphalt: A literature review. **Journal of Road Engineering**, 2025.

ANTUNES, V. et al. A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling. **Construction and Building Materials**, 2019.

ARAVINDMANIKANDAN, R. et al. Evaluation of Optimized Mixing Duration in Mixes Incorporating Coarse and Fine RAP Using a Performance Space Diagram. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2025.

BARRAJ, F.; ELKORDI, A. Investigating the effect of using unclassified fractionated reclaimed asphalt pavement materials on the properties of hot mix asphalt. **Construction and Building Materials**, 2022.

CENTOFANTE, R. et al. Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado. **Revista Matéria**, 2018.

DUARTE, G. M.; XIE, W.; CASTORENA, C. Variability of Plant-Produced High Recycled Content Asphalt Mixtures Within a State. **Transportation Research Record**, 2025.

DUARTE, G. M.; XIE, W.; CASTORENA, C. Variability in RAP and RAS stockpiles over time and their impacts on plant-produced asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, 2026.

FERREIRA, W. L. G. et al. The impact of aging heterogeneities within RAP binder on recycled asphalt mixture design. **Construction and Building Materials**, 2021.

GASPAR, M. S. et al. Evaluation of binder blending on warm mix asphalt recycling. **TRANSPORTES**, 2020.

KASEER, F. et al. Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States: A literature review. **Construction and Building Materials**, 2019.

KATLA, B. et al. Utilization of Higher Percentages of RAP for Improved Mixture Performance by Adopting the Process of Fractionation. **International Journal of Pavement Research and Technology**, 2022.

LI, M. et al. Low-temperature performance improvement strategies for high RAP content recycled asphalt mixtures: Focus on RAP gradation variability. **Fuel**, 2025.

LI, N. et al. The implementation of balanced mix design in asphalt materials: A review. **Construction and Building Materials**, 2023.

LI, N. et al. Investigation of Recycled Asphalt Pavement Materials Treated by Refined Crushing and Screening Process: Comparison with Conventional Methods. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2024.

MA, J. et al. Development and validation of an accurate, precise and safe method for the acceptance testing of recovered asphalt binder. **Construction and Building Materials**, 2023.

MA, Y. et al. Binder availability and blending efficiency of reclaimed asphalt: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, 2022.

MASCARENHAS, Z. M. G. et al. Comparative environmental performance of pavement structures considering recycled materials and regional differences. **Science of the Total Environment**, 2023.

MONTAÑEZ, J. et al. Component Materials Selection Guidelines and Evaluation Tools for the Development of Durable and Balanced Mixtures with High Recycled Asphalt Materials Contents. **Transportation Research Record**, 2026.

MONTEIRO, A. M. C.; SILVA, J. P. S.; REZENDE, L. R. Estudo laboratorial de misturas asfálticas recicladas à quente com diferentes teores de asfalto fresado. **TRANSPORTES**, 2023.

OREŠKOVIĆ, M. et al. Quantitative assessment of the parameters linked to the blending between reclaimed asphalt binder and recycling agent: A literature review. **Construction and Building Materials**, 2020.

PINHEIRO, G.; VASCONCELOS, K.; BERNUCCI, L. Reclaimed Asphalt Pavement Binder Extraction and Recovery Evaluation and Their Effects on the Recycling Agent Assessment. **Transportation Research Record**, 2022.

QU, L. et al. Experimental evaluation of fatigue performance of recycled asphalt mixture using refined separation recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, 2024.

SANTOLINI, E. et al. Towards more sustainable infrastructures through circular processes: Environmental performance assessment of a case study pavement with recycled asphalt in a life cycle perspective. **Journal of Cleaner Production**, 2024.

SHARMA, A. et al. Mix design, development, production and policies of recycled hot mix asphalt: A review. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, 2022.

VANGALA, R. R. et al. Balanced Mix Design as an Equalizer to Assess the Environmental Performance of Asphalt Mixtures. **Transportation Research Record**, 2025.

WANG, J. et al. Advances in the research of interfacial properties of reclaimed asphalt mixture: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, 2024.

WANG, P. et al. Evaluation of the Refined Decomposition Effect of Reclaimed Asphalt Pavement Materials. **Buildings**, 2023.

XING, C. 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**, 2023.

XING, C. et al. Hot central-plant recycling technology: A systematic review on raw materials and performance-influencing factors. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, 2025.

XU, G. et al. Mitigating RAP variability through detailed particle size classification: Applications in high RAP content asphalt mixtures. **Case Studies in Construction Materials**, 2025.

XU, G. et al. RAP variability intelligent control framework for hot in-plant recycling of asphalt pavement. **Results in Engineering**, 2025.

YU, J. et al. Long-term performance of recycled asphalt mixtures containing high RAP and RAS. **Journal of Road Engineering**, 2024.

ZAUMANIS, M. et al. Three indexes to characterise crushing and screening of reclaimed asphalt pavement. **International Journal of Pavement Engineering**, 2022.

ZHANG, K. et al. Research on the Performance of Ultra-High-Content Recycled Asphalt Mixture Based on Fine Separation Technology. **Materials**, 2025.

ZHANG, Y. et al. Evaluation and Control of Variability in RAP Properties Through Refined Fractionation Processing Methods. **Materials**, 2025.

ZHANG, Z. et al. A comprehensive review on the diffusion and blending states of aged and virgin asphalt in recycled asphalt mixtures: Mechanism, model and characterization. **Construction and Building Materials**, 2024.

ZHONG, H. et al. Critical considerations and effective assessment of extraction and recovery processes of RAP. **Construction and Building Materials**, 2023.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 031/2006-ES:** pavimentos flexíveis – concreto asfáltico – especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 033/2021-ES:** pavimentação asfáltica – mistura asfáltica reciclada a quente em usina – especificação de serviço. Brasília, DF: DNIT, 2021.

AZEVEDO, Rogério Cabral; ENSSLIN, Leonardo. **Metodologia da pesquisa para engenharias.** 1. ed. Belo Horizonte: PPGEC/CEFET-MG, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023:2018**: Informação e documentação — Referências — Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6024:2012**: Informação e documentação — Numeração progressiva das seções de um documento escrito — Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6027:2012**: Informação e documentação — Sumário — Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6028:2021**: Resumo, resenha e recensão — Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520:2023**: Citações em documentos — Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724:2024**: Trabalhos acadêmicos — Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.