

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

LAIANY TEIXEIRA COSTA

AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM PAVIMENTO ASFÁLTICO
RECUPERADO (RAP)

Manaus – AM

2026

LAIANY TEIXEIRA COSTA

AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM PAVIMENTO ASFÁLTICO
RECUPERADO (RAP)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Dra. Consuelo Alves da Frota

Manaus – AM

2026

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

-
- C837a Costa, Laiany Teixeira
Avaliação de misturas asfálticas com Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP) / Laiany Teixeira Costa. - 2026.
91 f. ; 31 cm.
- Orientador(a): Consuelo Alves da Frota.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Manaus - AM, 2026.
1. RAP-Pavimento Asfáltico Recuperado. 2. Misturas asfálticas recicladas. 3. Módulo de resiliência. 4. Resistência à tração. 5. Trecho experimental. I. Frota, Consuelo Alves da. II. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. III. Título
-

LAIANY TEIXEIRA COSTA

AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM PAVIMENTO ASFÁLTICO
RECUPERADO (RAP)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 30/06/2026

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Consuelo Alves da Frota

Orientadora e Presidente

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM-UFAM)

Prof. Dr. Leandro Aparecido Pocrifka

Membro Interno

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM-UFAM)

Profa. Dra. Valdete Santos de Araújo

Membro Externo

Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por não me deixar desistir nos momentos difíceis. Carrego comigo, palavras que repito pra mim mesma como forma de incentivo, desde quando eu sonhava em passar no ENEM, e foram nelas que me apeguei quando queria passar no mestrado: Fé, Confiança, Esperança, Determinação e Força de Vontade.

Agradeço cada membro da minha família, que de alguma forma contribuiu para que eu chegasse até aqui. Em especial à minha mãe Maria de Jesus, que é exemplo de mulher com coragem, ao meu pai Rosalvo Lima, aos meus irmãos Wanderson e Weverton, e à minha avó Nair Teixeira. À minha avó Eva Costa, a qual não pude me despedir presencialmente e que agora está ao lado do Senhor, você estará sempre no meu coração.

Aos meus tios Frank e Darlisom, que abriram as portas de sua casa, me receberam e proporcionaram diversos ensinamentos e conhecimentos, que sempre me incentivaram em tudo. Obrigada por todo suporte em todos esses anos. À Sabrina pelo incentivo e por estar presente nos momentos em que eu não conseguia escrever e estava desmotivada para continuar, obrigada pelo abraço e pelas palavras de aconchego. À minha psicóloga Maísa Bastos, que além do apoio profissional me ensinou diversos métodos de pesquisa.

Aos meus amigos, que as vezes mesmo de longe, estiveram presentes com palavras de conforto e incentivo. Em especial àqueles que dividiram comigo essa jornada: Isabelle, Maria Gabriele, Denilson e Raylene, os encontros na cantina para lanchar, tomar um café e desabafar sobre os desafios enfrentados salvavam os dias difíceis. Ao Eduardo, parceiro de pesquisa e de disciplinas, por dividir o conhecimento.

Ao time de Futsal feminino da UFAM, por me acolher e proporcionar a prática do esporte que eu amo, fundamental para equilibrar os estudos com a saúde física e psicológica.

À minha orientadora Prof.^a Dr.^a. Consuelo Alves da Frota, por todo suporte, ensinamentos e pela dedicação ao longo desta pesquisa. Sou grata a Deus por ter colocado você na minha vida e permitido esse encontro. Com você aprendi não somente os fundamentos da pavimentação e da pesquisa científica, mas também que somos capazes de sonhar e realizar aquilo que sonhamos. Tenho imensa admiração por você, pela mulher, pela profissional de referência que inspira todos ao seu redor. Obrigada pela preocupação e pelo cuidado de sempre. Ao meu coorientador Prof. Dr. Hidembergue Ordozgoith da Frota, pelos conhecimentos passados, sua inteligência é além do admirável. Ao Daniel Almeida, que esteve presente em

todas as etapas, compartilhando conhecimentos, obrigada pelo suporte na realização dos ensaios. Sua ajuda foi crucial para o êxito desta pesquisa.

À empresa parceira e seus sócios, por viabilizar esta pesquisa e pelo suporte técnico e operacional. À M.Sc. Anne Karolynne Monteiro por toda a colaboração, admiro sua trajetória e a profissional de excelência que você é. Ao Fábio e ao Jonathan por compartilharem seus conhecimentos técnicos e práticos de ensaios laboratoriais.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento desta pesquisa, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) e à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM/UFAM) pelo apoio institucional.

Ao laboratório de Geotecnologia GEOTEC/UFAM, ao Laboratório de Eletroquímica e Energia (LEEN/UFAM), Laboratório de polímeros Nanoestruturados (NANOPOL/UFAM) e ao Laboratório Temático de Microscopia e Nanotecnologia (LTMN) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), pela infraestrutura e disponibilidade.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta jornada, meu muito obrigada.

RESUMO

A incorporação de Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP) em misturas asfálticas a quente constitui uma alternativa técnica, econômica e ambiental de crescente interesse no setor de infraestrutura rodoviária. A presente pesquisa comparou de forma inédita o comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas em usina com diferentes teores de RAP (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40%), a partir das quais se moldaram corpos de prova em laboratório e se executou um trecho experimental de campo. Após um ano de execução, coletaram-se amostras do pavimento nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 35% de RAP e realizaram-se ensaios de Módulo de Resiliência (MR) e de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), com o objetivo de comparar o desempenho dos corpos de prova moldados em laboratório ao das amostras extraídas após um ano de tráfego e de exposição climática. A caracterização dos materiais procedeu por meio de análises granulométricas, Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia por Dispersão de Energia (MEV/EDS) e Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) do ligante recuperado do RAP. As misturas foram produzidas em usina contínua, com granulometria enquadrada na Faixa C-12,5 conforme a DNIT ES 031/2006, e dosagem pelo método Marshall. Os resultados laboratoriais evidenciaram tendência crescente do MR (5.703,6 a 8.467,5 MPa) e da RT (1,635 a 2,042 MPa) com o aumento do teor de RAP, atribuída ao enrijecimento promovido pelo ligante envelhecido residual do material fresado. Nos corpos de prova extraídos de campo, os valores de MR variaram entre 4.743,3 MPa e 5.515,0 MPa, e os de RT entre 1,105 MPa e 1,575 MPa, com reduções médias de aproximadamente 24% e 22% em relação às amostras de laboratório, respectivamente. Todos os valores de RT atenderam ao limite mínimo de 0,65 MPa estabelecido pela DNIT ES 031/2006. Conclui-se que a incorporação do RAP em misturas asfálticas recicladas a quente é técnica e ambientalmente viável, proporcionando acréscimo nos valores de MR e RT sem comprometer o desempenho mecânico das composições.

Palavras-chave: RAP-Pavimento Asfáltico recuperado; Misturas asfálticas recicladas; Módulo de resiliência; Resistência à tração; Trecho experimental.

Abstract

The incorporation of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) into hot-mix asphalt mixtures constitutes a technical, economic, and environmental alternative of growing interest in the road infrastructure sector. This research uniquely compared the mechanical behavior of asphalt mixtures produced in a plant with different RAP contents (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, and 40%), from which laboratory specimens were molded and an experimental field section was constructed. One year after construction, pavement samples were collected at proportions of 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, and 35% RAP, and Resilient Modulus (RM) and Indirect Tensile Strength (ITS) tests were performed, aiming to compare the performance of laboratory-molded specimens with that of samples extracted after one year of traffic and climatic exposure. Material characterization was carried out through granulometric analyses, Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive Spectroscopy (SEM/EDS), and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) of the binder recovered from the RAP. The mixtures were produced in a continuous-flow plant, with gradation conforming to Grading Range C-12.5 according to DNIT ES 031/2006 and were designed using the Marshall method. Laboratory results showed an increasing trend in RM (5,703.6 to 8,467.5 MPa) and ITS (1.635 to 2.042 MPa) with increasing RAP content, attributed to the stiffening effect promoted by the residual aged binder from the milled material. In the field-extracted specimens, RM values ranged from 4,743.3 MPa to 5,515.0 MPa, and ITS values ranged from 1.105 MPa to 1.575 MPa, with average reductions of approximately 24% and 22% compared to laboratory samples, respectively. All ITS values met the minimum limit of 0.65 MPa established by DNIT ES 031/2006. It is concluded that the incorporation of RAP into hot recycled asphalt mixtures is technically and environmentally feasible, providing increases in RM and ITS values without compromising the mechanical performance of the compositions.

Keywords: RAP-Reclaimed Asphalt Pavement; Recycled asphalt mixtures; Resilient modulus; Indirect tensile strength; Experimental section.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Cenários da interação entre o ligante e o agente de reciclagem.....	22
Figura 2.2 – Espectro FTIR das amostras recolhidas durante o processo de recuperação do ligante asfáltico do RAP	23
Figura 2.3 – Fatores de produção que influenciam o grau de mistura entre o RAP e os agregados virgens	25
Figura 2.4 – Adição de RAP (frio e com baixo teor de umidade) no misturador de uma usina gravimétrica	26
Figura 2.5 – Entrada de RAP (frio e com baixo teor de umidade) na parte inferior do elevador em uma usina gravimétrica.....	27
Figura 2.6 – Configuração de usina gravimétrica com secador externo para pré-aquecimento do RAP	28
Figura 2.7 – Configuração da entrada de RAP em um misturador contínuo ao secador de contrafluxo.....	29
Figura 2.8 – Resultados de todas as misturas obtidos no ensaio de MR	32
Figura 3.1 – Processo de obtenção do RAP	35
Figura 3.2 – Caracterização dos agregados e do RAP por MEV e EDS	38
Figura 3.3 – Ensaio de FTIR no ligante do RAP	39
Figura 3.4 – Curvas granulométricas – misturas com RAP de 0% a 20%	40
Figura 3.5 – Curvas granulométricas – misturas com RAP de 25% a 40%	41
Figura 3.6 – Usina ACM Prime 2.0 da AMMANN	42
Figura 3.7 – Confeção dos corpos de prova de laboratório	43
Figura 3.8 – Execução da camada asfáltica com vibroacabadora no trecho experimental	44
Figura 3.9 – Localização das amostras coletadas em campo	45
Figura 3.10 – Extração dos corpos de prova do campo.....	46
Figura 3.11 – Retificação dos corpos de prova de campo	47
Figura 3.12 – Corpo de prova de campo e de laboratório	47
Figura 3.13 – Corpos de prova de laboratório e de campo.....	48

Figura 3.14 – Corpo de prova durante o ensaio de Módulo de Resiliência.....	50
Figura 3.15 – Esquema do ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral .	51
Figura 4.1 – Curvas granulométricas dos agregados.....	54
Figura 4.2 – Micrografias MEV da BGS (AB) nas escalas de (a) 100 µm e (b) 20 µm	55
Figura 4.3 – Imagens da amostra de BGS (AB).....	56
Figura 4.4 – Distribuição percentual em peso dos elementos da BGS (AB).....	57
Figura 4.5 – Micrografias MEV da Areia (AA) nas escalas de (a) 50 µm e (b) 10 µm.....	57
Figura 4.6 – Imagens da amostra de Areia (AA).....	58
Figura 4.7 – Distribuição percentual em peso dos elementos da Areia (AA)	59
Figura 4.8 – Percentual de ligante asfáltico presente no RAP.....	61
Figura 4.9 – Curva granulométrica do RAP após extração do ligante	61
Figura 4.10 – Micrografias MEV do RAP (AR) nas escalas de (a) 1 mm, (b) 100 µm região 1, (c) 100 µm região 2 e (d) 50 µm	63
Figura 4.11 – Imagens da amostra de RAP (AR).....	64
Figura 4.12 – Distribuição percentual em peso dos elementos do RAP (AR)	65
Figura 4.13 – Espectro FTIR do ligante extraído do RAP	66
Figura 4.14 – Módulo de resiliência médio × teor de RAP – corpos de prova de laboratório. Barras de erro = ±1 desvio-padrão	68
Figura 4.15 – Módulo de resiliência médio × teor de RAP – corpos de prova de campo. Barras de erro = ±1 desvio-padrão.....	70
Figura 4.16 – Resistência à tração média × teor de RAP – corpos de prova de laboratório. Barras de erro = ±1 desvio-padrão	71
Figura 4.17 – Resistência à tração média × teor de RAP – corpos de prova de campo. Barras de erro = ±1 desvio-padrão.....	74
Figura 4.18 – MR – laboratório e campo × % de RAP	76
Figura 4.19 – RT – laboratório e campo × % de RAP	76
Figura 4.20 – Razão MR/RT × teor de RAP – laboratório e campo	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resumo dos resultados da Resistência à Tração	30
Tabela 4.1 – Valores de densidade e dos agregados.....	54
Tabela 4.2 – Composição química elementar da BGS (AB) por EDS	56
Tabela 4.3 – Composição química elementar da Areia (AA) por EDS.....	58
Tabela 4.4 – Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP 50/70	59
Tabela 4.5 – Teor de ligante residual do estoque de RAP	60
Tabela 4.6 – Composição química elementar do RAP (AR) por EDS.....	64
Tabela 4.7 – Resumo da análise estatística – MR laboratório.....	69
Tabela 4.8 – Resumo da análise estatística – MR campo.....	70
Tabela 4.9 – Resumo da análise estatística – RT laboratório.....	73
Tabela 4.10 – Resumo da análise estatística – RT campo.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
ANP	<i>Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis</i>
ANOVA	<i>Análise de Variância (Analysis of Variance)</i>
ANPET	<i>Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes</i>
AR	<i>Amostra de RAP (identificação de corpo de prova)</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATR	<i>Afundamento de Trilha de Roda</i>
CA	<i>Concreto Asfáltico</i>
CAP	<i>Cimento Asfáltico de Petróleo</i>
CAUQ	<i>Concreto Asfáltico Usinado a Quente</i>
CV	<i>Coeficiente de Variação</i>
DNER	<i>Departamento Nacional de Estradas de Rodagem</i>
DNIT	<i>Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes</i>
DP	<i>Desvio Padrão</i>
EDS	<i>Espectroscopia por Dispersão de Energia (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy)</i>
ES	<i>Especificação de Serviço</i>
FTIR	<i>Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)</i>
FWD	<i>Defletômetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer)</i>
GEOTEC	<i>Grupo de Pesquisa em Geotecnia – UFAM</i>
GPC	<i>Cromatografia por Permeação em Gel (Gel Permeation Chromatography)</i>
HMA	<i>Hot Mix Asphalt (Mistura Asfáltica a Quente)</i>
INPA	<i>Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia</i>
IRI	<i>Índice de Irregularidade Internacional (International Roughness Index)</i>
LTMN	<i>Laboratório Temático de Microscopia e Nanotecnologia</i>
LVDT	<i>Transdutor Diferencial de Deslocamento Linear (Linear Variable Differential Transformer)</i>
ME	<i>Método de Ensaio</i>
MEV	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura</i>
MPD	<i>Profundidade Média de Perfil (Mean Profile Depth)</i>

MR	<i>Módulo de Resiliência</i>
NANOPOL	<i>Laboratório de Polímeros Nanoestruturados – UFAM</i>
PRO	<i>Procedimento (norma DNIT)</i>
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement (Pavimento Asfáltico Recuperado)</i>
REAM	<i>Refinaria de Manaus S.A.</i>
REMAN	<i>Refinaria Isaac Sabbá</i>
RT	<i>Resistência à Tração por Compressão Diametral</i>
RTFOT	<i>Rolling Thin-Film Oven Test</i>
SUPERPAVE	<i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
UFAM	<i>Universidade Federal do Amazonas</i>
UTM-100	<i>Universal Testing Machine – 100 kN</i>
VAM	<i>Vazios do Agregado Mineral</i>
WMA	<i>Warm Mix Asphalt (Mistura Asfáltica Morna)</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Nível de significância estatística
ΔH	Deslocamento horizontal resiliente (mm)
η^2	Eta-quadrado – tamanho de efeito (ANOVA)
μ	Coefficiente de Poisson
μm	Micrômetro
ω^2	Ômega-quadrado – tamanho de efeito
σ_R	Resistência à tração (MPa)
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
%	Porcentagem
A	Massa da amostra seca em estufa (g)
Al_2O_3	Óxido de alumínio
B	Massa do picnômetro com água (g)
B1	Massa da amostra saturada com superfície seca (g)
C	Massa do picnômetro com amostra e água (g)
cm	Centímetro
cm^{-1}	Número de onda (espectroscopia)
CO_2	Dióxido de carbono
D	Diâmetro do corpo de prova (mm)
F	Carga de ruptura (N)
g	Grama
G^*	Módulo complexo do ligante asfáltico
Gsa	Densidade relativa real do agregado
Gsb	Densidade relativa aparente do agregado
H	Altura/espessura do corpo de prova (mm)
H(k)	Estatística do teste de Kruskal-Wallis
IS=O	Índice de sulfóxido (FTIR)

kg	Quilograma
kPa	Quilopascal
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
MR	Módulo de resiliência (MPa)
N	Newton
n	Número de corpos de prova por grupo
P	Carga cíclica aplicada (N)
p	p-valor (probabilidade estatística)
q	Estatística do teste de Tukey HSD
RT	Resistência à tração (MPa)
S=O	Grupo funcional sulfóxido
SiO ₂	Dióxido de silício
t	Espessura do corpo de prova (mm)
W	Estatística do teste de Shapiro-Wilk

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos.....	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivos Específicos	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)	20
2.1.1 Dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente	24
2.1.2 Tipos de usinas adaptadas para o uso do RAP	25
2.1.3 Comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas.....	29
2.2 Aplicação em campo de misturas recicladas com RAP	32
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 Materiais	34
3.1.1 Agregados convencionais e cimento asfáltico de petróleo	34
3.1.2 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)	35
3.2 Métodos	36
3.2.1 Caracterização dos materiais	36
3.2.1.1 Agregados e Cimento Asfáltico de Petróleo.....	36
3.2.1.2 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)	38
3.2.2 Produção das misturas asfálticas	39
3.2.2.1 Dosagem	39
3.2.2.2 Preparação das misturas em usina	41
3.2.2.3 Confeção dos corpos de prova	42
3.2.3 Trecho experimental	43
3.2.4 Avaliação mecânica	48
3.2.4.1 Módulo de Resiliência e Resistência à Tração	49

3.2.5 Método de análise	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 Caracterização dos Materiais.....	53
4.1.1 Agregados e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)	53
4.1.2 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)	60
4.1.3 Espectroscopia de infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)do ligante extraído do RAP	65
4.2 Avaliação Mecânica	67
4.2.1 Módulo de Resiliência (MR)	67
4.2.2 Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral (RT).....	71
4.2.3 Análise laboratório x campo	75
4.2.4 Razão MR/RT	77
4.2.5 Discussão com a literatura	79
5 CONCLUSÃO.....	83
REFERÊNCIAS	85

1. INTRODUÇÃO

Os recursos naturais tornam-se cada vez mais escassos, o que impõe a necessidade de desenvolver tecnologias ecoeficientes capazes de mitigar os impactos ambientais gerados pela construção civil. Nesse contexto, diversos países têm buscado alternativas sustentáveis para a pavimentação, com destaque para o emprego do material asfáltico fresado, internacionalmente conhecido como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). Conforme pontuam Giani *et al.* (2015), a deficiência de matérias-primas disponíveis, somada ao aumento dos preços dos insumos empregados na produção e execução de pavimentos flexíveis, impõe desafios aos órgãos públicos quanto a indústria da pavimentação, demandando metodologias sustentáveis direcionadas à construção e manutenção das rodovias.

A Resolução nº 14 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) reforça que o emprego do RAP é uma solução que favorece tanto a sustentabilidade quanto a economia no setor de infraestrutura rodoviária. No quesito técnico, o material também tem se mostrado promissor: Bai *et al.* (2024) observaram que o concreto betuminoso composto com RAP resulta em boa trabalhabilidade, resistência à fadiga e redução dos custos de fabricação em até 27%; ademais, promove melhorias na resistência a danos por umidade e no comportamento mecânico (Yousefi *et al.*, 2023). A utilização do asfalto reciclado como substituto parcial na formulação de novos concretos betuminosos proporciona redução significativa dos custos de matéria-prima e, conseqüentemente, do valor final de produção (Chen *et al.*, 2021). A pesquisa de Santolini *et al.* (2024) evidência, ainda, que a incorporação de maiores teores de RAP nas usinas oferece decréscimo de 28% a 39% das emissões de CO₂ durante o ciclo de produção, a depender das quantidades adotadas, e de 13% ao longo da vida útil do pavimento.

Segundo Luzzi (2019), a incorporação de RAP na produção de misturas asfálticas exige adaptações no processo convencional das usinas. Tais modificações têm como finalidade aquecer a mistura sem expor o material fresado diretamente à chama do secador, evitando sobreaquecimento. Nesse caso, é necessário a instalação de um silo específico para o RAP. O autor avaliou misturas com 10, 20 e 30% de RAP produzidas em usinas. Concluiu que para os ensaios de Módulo de Resiliência (MR) e Resistência à Tração (RT), os resultados demonstraram aumento progressivo conforme o acréscimo do teor desse material fresado. Também, identificou ganhos ambientais e financeiros associados às composições produzidas.

Apesar dos benefícios ambientais e econômicos, a incorporação do RAP introduz no novo concreto asfáltico um ligante asfáltico já envelhecido em serviço, cujo grau de oxidação influencia diretamente o comportamento mecânico da mistura. Estudos sobre formulações contendo asfalto recuperado indicam aumento da rigidez e da resistência à deformação permanente quando aplicado em altos teores, relativamente à mistura de controle. Por outro lado, observa-se divergência de resultados quanto à resistência à tração e à vida de fadiga: algumas pesquisas demonstram impacto negativo do ligante envelhecido, enquanto outras registram desempenho satisfatório ou superior ao de misturas convencionais (Suzuki, 2019). Soma-se a essa divergência o fato de que grande parte dos estudos disponíveis se baseia exclusivamente em corpos de prova moldados em laboratório, sendo escassas as investigações que confrontam o desempenho laboratorial com o de composições produzidas em usina e aplicadas em campo.

Diante desse cenário, esse estudo parte da hipótese de que o aumento do teor de RAP em misturas asfálticas a quente promove o enrijecimento progressivo do concreto betuminoso, expresso pelo aumento do módulo de resiliência e da resistência à tração, em decorrência do envelhecimento oxidativo do ligante presente no material fresado, e que esse comportamento se mantém tanto em corpos de prova moldados em laboratório quanto em amostras extraídas de campo, ainda que com magnitudes distintas entre os dois contextos. Pressupõe-se, adicionalmente, que mesmo em teores elevados as misturas recicladas atendam aos requisitos mecânicos mínimos estabelecidos pela normatização brasileira, viabilizando tecnicamente a sua utilização.

A presente pesquisa fundamenta-se na convergência dos quesitos ambiental, técnico e científico. Do ponto de vista ambiental, a reutilização do RAP mostra-se como uma alternativa para reduzir a extração de agregados naturais e o consumo de ligante virgem, além de conferir destinação adequada a um resíduo gerado em larga escala nas operações de fresagem, alinhando-se aos princípios da economia e da sustentabilidade na pavimentação. No âmbito técnico, a incorporação de RAP em novas formulações asfálticas depende do conhecimento sobre o ligante envelhecido presente nesse material e de que forma este pode afetar as propriedades mecânicas da mistura reciclada. Já na perspectiva científica, a carência de estudos que confrontem sistematicamente o desempenho mecânico de misturas recicladas em laboratório e em campo constitui uma lacuna relevante na literatura.

À vista do exposto, o presente trabalho participa de um projeto piloto inédito, em sua fase inicial, para investigar o comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo concreto

asfáltico a quente, produzidas com diferentes teores de RAP, por meio dos ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral, comparando corpos de prova moldados em laboratório (0% a 40% de RAP) com amostras extraídas do trecho experimental (5% a 35% de RAP), após um ano de execução e em condições de serviço, permitindo extrair conclusões significativas sobre a evolução do comportamento mecânico da mistura asfáltica após um ano de tráfego real, maximizando o aproveitamento do material extraído e respeitando as limitações impostas pela oportunidade singular de pesquisa.

1.1 Objetivos

1.1.1 GERAL

Investigar as composições asfálticas do tipo concreto asfáltico (CA) com a inserção de diferentes teores de RAP, sob condições laboratoriais e amostras provenientes de um trecho experimental, após um ano sob tráfego.

1.1.2 ESPECÍFICOS

- a) Caracterizar os componentes das misturas, por meio de ensaios físicos, químicos e mineralógicos;
- b) Obter composições asfálticas (CA) com adição de RAP produzidas em usina e compactadas em laboratório;
- c) Obter composições asfálticas (CA) com adição de RAP extraídas da via urbana após 1 ano sob tráfego;
- d) Analisar, de forma comparativa o desempenho mecânico das composições asfálticas laboratoriais e extraídas de campo após um ano de execução do pavimento;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O pavimento é um sistema, executado após a terraplanagem, constituído pelo revestimento na superfície e pelas demais componentes estruturais — base, sub-base e subleito. A capacidade de carga dessas camadas é decrescente com a profundidade, possuindo espessuras predefinidas em projeto. A estrutura tem como função principal resistir e distribuir as cargas do tráfego, de forma segura até o subleito (fundação), além de conferir resistência à derrapagem, ao desgaste e à ação das intempéries (Instituto de Asfalto, 1989, DNIT, 2006, Oliveira, 2020, Pereira, 2023).

Em particular, os revestimentos asfálticos desempenham um importante papel na absorção das cargas geradas pelo tráfego. Outrossim, têm a finalidade de garantir conforto e segurança aos usuários da via (Pereira, 2020). Tais formulações podem ser produzidas em condições frias, meio mornas, mornas e quentes, ou seja, fabricadas com variações de temperaturas que correspondem, respectivamente, entre 0 a 40°C, 65 a 100°C, 110 a 140°C e 140 a 180°C (Kadhim *et al.*, 2022).

No caso do revestimento do tipo concreto asfáltico (CA), conforme a norma DNIT ES 031 (2024), consiste em uma mistura densa e de granulometria contínua, constituída por cimento asfáltico de petróleo (CAP), agregados minerais e enchimento. Sua produção em usina, assim como sua aplicação e compactação, exige altas temperaturas para assegurar a viscosidade ideal do ligante, a secagem dos agregados e uma adesão efetiva entre os materiais (Zubaran, 2014). Contudo, esse processo termicamente intenso acarreta impactos ambientais.

Salienta-se que tais camadas superficiais podem ser reutilizadas na construção dos pavimentos, por meio do processo de reciclagem, seja a quente ou a frio, executada *in loco* ou em usina. Segundo a norma DNIT ES 033 (2021), o concreto asfáltico reciclado a quente é obtido em unidades gravimétricas ou contínuas, composto por RAP, também conhecido como pavimento asfáltico recuperado, cimento asfáltico, agregados, e quando necessário, filler, aditivos ou agentes de reciclagem. A composição é fabricada, espalhada e compactada em temperaturas típicas das misturas asfálticas a quente, podendo ser reduzidas, no caso das misturas mornas (*Warm Mix Asphalt*). A proporção de RAP empregada deve ser definida em projeto, considerando as condições operacionais da usina responsável pela produção (DNIT, 2021).

Em conformidade com a ABNT NBR 17100-1 (2023), o gerenciamento de resíduos é definido como um conjunto sistemático de operações realizadas para a destinação ambientalmente adequada de resíduos, com o objetivo expresso de promover a conservação dos recursos naturais, a proteção da saúde pública e a preservação do meio ambiente. A norma estabelece, outrossim, que os subprodutos industriais consistem naqueles materiais gerados no âmbito dos sistemas de fabricação e instalações industriais. Ademais, a referida normativa conceitua a reciclagem como um processo de transformação de resíduos sólidos que implica a modificação de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com a finalidade de reinseri-los em um ciclo produtivo, seja como matéria-prima no processo que lhes deu origem, seja em cadeias produtivas distintas.

Diante da premente busca por soluções sustentáveis que mitiguem os impactos ambientais e otimizem a utilização de recursos, investigações científicas contemporâneas têm demonstrado crescente interesse na aplicação de materiais reciclados. Nesse contexto, verifica-se na literatura técnica substantivos estudos dedicados a investigar e viabilizar a incorporação do RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), um resíduo oriundo da fresagem de pavimentos betuminosos, em novas camadas de infraestrutura rodoviária, representando uma prática alinhada aos preceitos da economia circular (Bocci; Prosperi; Bocci, 2023, Vidal *et al.*, 2020, Correa, 2020).

2.1 *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP)

De acordo com a norma DNIT ES 033 (2021), a fresagem é definida como uma operação de natureza mecânica, passível de execução sob condições térmicas quentes ou frias, que tem por objetivo o corte ou desbaste de uma ou múltiplas camadas do pavimento asfáltico. Esta intervenção visa primordialmente a remoção de segmentos deteriorados da estrutura pavimentar, possibilitando sua posterior restauração às condições funcionais e geométricas projetadas. O produto resultante deste processo é designado *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) ou Pavimento Asfáltico Recuperado.

A técnica de fresagem emergiu no cenário da engenharia rodoviária como uma metodologia eficaz para a reabilitação de revestimentos que apresentam manifestações patológicas. A execução dessa intervenção executa-se por meio de equipamentos especializados, denominados fresadoras, as quais permitem uma classificação do serviço com base em dois parâmetros principais: a espessura de corte, categorizada como superficial, rasa

ou profunda; e o tipo de rugosidade, distinguindo-se entre os padrões convencional, fino ou de microfresagem (Chaves, 2023).

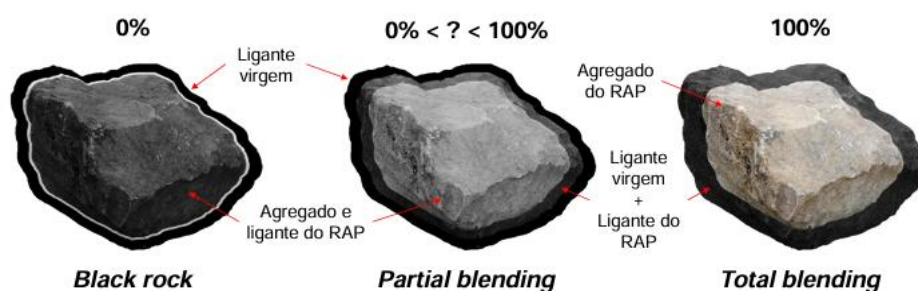
Conforme citado, a reciclagem constitui um processo de reaproveitamento de materiais que já cumpriram sua função original, reinserindo-os no ciclo produtivo. Com o objetivo de investigar alternativas mais sustentáveis para infraestruturas de transporte, White, Fairweather e Jamshidi (2018) desenvolveram um estudo de caso referente a uma pista de aeroporto na Austrália. Os pesquisadores analisaram comparativamente três distintas formulações de projeto: a primeira consistindo em composição com asfalto convencional; a segunda incorporando o reaproveitamento da camada granular de base, estabilizada com betume; e a terceira envolvendo a reciclagem do revestimento asfáltico existente no local. A avaliação dessas alternativas foi realizada com base em uma análise tripartite de custos: financeiros, sociais e ambientais. Os resultados demonstraram que a execução de um novo pavimento conforme o método convencional representou a alternativa com maiores dispêndios em todas as dimensões consideradas. Em contrapartida, as soluções que empregaram reutilização (segunda formulação) e reciclagem (terceira formulação) registraram reduções de 25% e 14%, respectivamente, nos custos globais, abrangendo os aspectos financeiro, social e ambiental. As alternativas sustentáveis propiciaram uma economia financeira direta na ordem de 20%, superando substancialmente a dimensão econômica. Os ganhos ambientais gerados alcançaram patamares de 51% e 67%, ao passo que os avanços sociais registraram índices de 76% e 88%, atribuídos respectivamente às estratégias de reutilização e reciclagem. Esses expressivos resultados decorreram fundamentalmente da substantiva redução nas emissões de gases de efeito estufa, da otimização no consumo de materiais virgens e da marcante minimização na geração de resíduos. Tais indicadores corroboram a preponderância da abordagem sob o prisma de uma integral sustentabilidade, ou seja, demonstrou-se a possibilidade de conciliar eficiência operacional com responsabilidade socioambiental no âmbito da engenharia de pavimentos.

Oliveira (2020) descreve o RAP como uma composição de agregados, envoltos por filer e cimento asfáltico antigo, que formam os grumos do revestimento fresado. Entre suas características que podem ser consideradas ativas ou inativas na nova composição citam: a granulometria, a consistência e o teor de aglomerante. Quando ativo, o ligante presente no RAP contribui com propriedades aglomerantes, conferindo coesão à mistura. Em contrapartida, quando inativo, apresenta oxidação elevada e comportamento semelhante ao de um agregado convencional, nesse caso, não contribui positivamente para a adesividade. Ademais, Correa

(2020) afirma que a necessidade de CAP virgem diminui conforme é adicionado maiores proporções de RAP, corroborando que o ligante presente no material fresado é reativado.

Gaspar (2019) ressalta que mesmo que o cimento asfáltico do RAP atinja 100% de ativação, a interação completa, caracterizada pela formação de uma película homogênea, pode não ocorrer, dependendo principalmente do tempo e da temperatura de usinagem. Outros fatores, como o tipo e o teor de RAP e o agente de reciclagem utilizado, também influenciam a *blending*. Pinheiro (2021) descreve três seguintes condições alusivas ao comportamento resultante entre o aglomerante virgem e o antigo presente no RAP: ausência de interação (identificada como *black rock* ou agregado negro), interação total (*total blending*) e uma interação parcial (*partial blending*), que são ilustradas na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Cenários da interação entre o ligante e o agente de reciclagem.



Fonte: (Pinheiro, 2021).

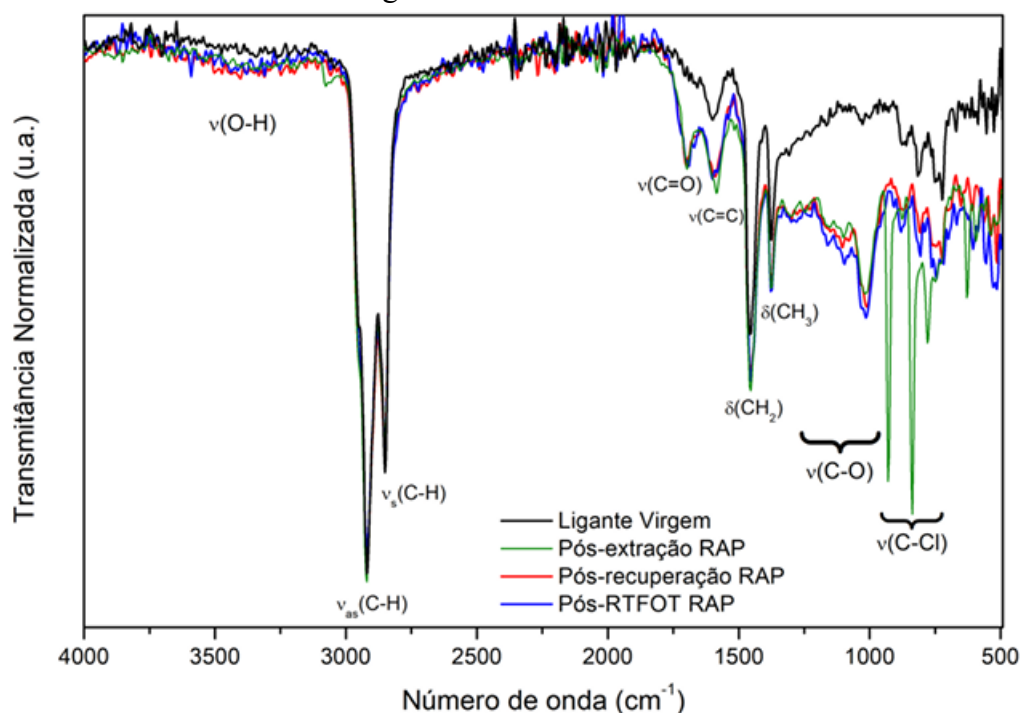
O citado autor, com base na literatura, verificou também que há diferentes metodologias que podem ser utilizadas para averiguar o comportamento do RAP em novas formulações, tais como: a espectroscopia por energia dispersiva (EDS - *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*), a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR - *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) e a cromatografia por permeação em gel (GPC - *Gel Permeation Chromatography*), que avaliam a não uniformidade, a complexidade em alcançar uma interação completa entre os componentes e a influência da temperatura durante o condicionamento e mistura dos materiais (Pinheiro, 2021).

De acordo com Lopes (2023), a espectroscopia FTIR apresenta-se como um recurso eficiente para estudar a composição química e as alterações do ligante asfáltico após o envelhecimento. Este método permite, de igual modo, identificar os elementos resultantes do processo de oxidação; bem como a matéria orgânica, polimérica e, em alguns casos, materiais inorgânicos; igualmente verificar os diferentes tipos de ligações e funções químicas e realizar

a análise qualitativa da estrutura molecular. A autora menciona ainda os fatores que ocasionam o envelhecimento do ligante, como a exposição ao oxigênio, à água, à radiação ultravioleta e às variações de temperatura, bem como reações químicas com os agregados. Tais agentes alteram a composição química, física e reológica, que gera fragilidade, perda de desempenho e redução da vida útil do pavimento.

Arruda (2021) caracterizou diferentes ligantes asfálticos por meio de espectroscopia FTIR com sonda ATR, na faixa de 4000 a 500 cm^{-1} , utilizando Espectrômetro *Bruker Vertex 70*. A análise espectral evidenciou as bandas características de ligantes asfálticos envelhecidos, com destaque para as vibrações de estiramento C–H alifático em torno de 2900 cm^{-1} , carbonilas de cetonas (C=O) em torno de 1700 cm^{-1} e picos para estiramento simétrico de C-O em éteres e/ou álcoois na faixa de 1020 e 1300 cm^{-1} . Observou ainda, picos de transmitância em 780, 845 e 930 cm^{-1} , referente às ligações C-Cl do solvente tricloroetileno usado na extração do ligante do CAP.

Figura 2.2 - Espectro FTIR das amostras recolhidas durante o processo de recuperação do ligante asfáltico do RAP.



Fonte: (Arruda, 2021).

2.1.1 DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE

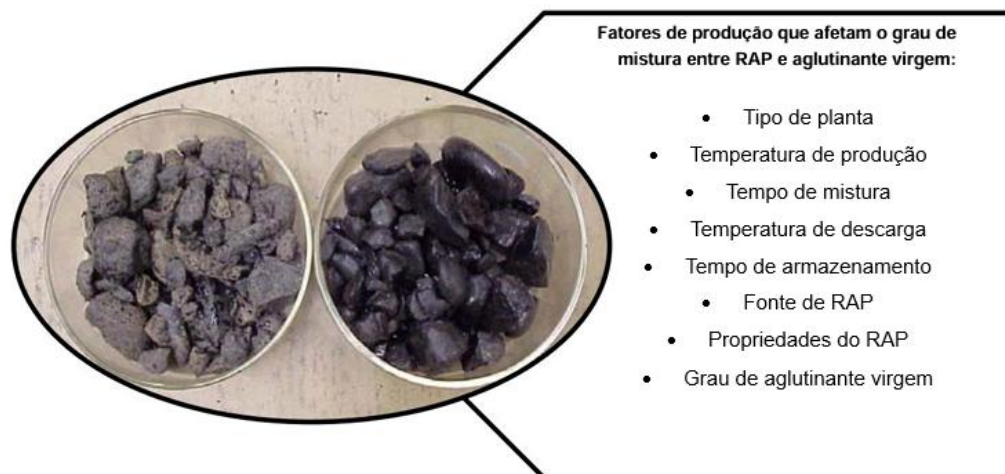
De acordo com Chamouton (2024), a dosagem de composições asfálticas a quente com RAP deve seguir os mesmos critérios de desempenho das formulações convencionais, porém

com adaptações para considerar a granulometria do material reciclado as propriedades de seu ligante. O autor explica que, enquanto parâmetros volumétricos, como o Vazios do Agregado Mineral (VAM), são cruciais para definir o teor ótimo de ligante em misturas convencionais, seu cálculo torna-se complexo no caso do RAP, uma vez que os agregados já estão parcialmente revestidos. Acrescenta-se que, a norma AASHTO M 323-22 recomenda para teores: a) entre 15% e 25%, o uso de um cimento asfáltico virgem de grau PG mais “mole”; e b) superiores a 25%, a necessidade de definir o CAP considerando a contribuição do ligante presente no RAP.

No que se refere aos objetivos da dosagem, Reis (2013) dispõe que a formulação visa produzir um material trabalhável que promova características essenciais como estabilidade, durabilidade, flexibilidade, impermeabilidade e resistência ao atrito. Entre as metodologias de dosagem mais conhecidas, para obter essas propriedades, destacam-se os métodos Marshall, Hveem e o SUPERPAVE.

No contexto das formulações recicladas, Sharma *et al.* (2021) afirmam que a porcentagem de incorporação de RAP mais comum é de 20%, devido às incertezas sobre a influência do material no desempenho da mistura. Além disso, teores elevados de asfalto reciclado podem elevar a rigidez e reduzir a trabalhabilidade, podendo ocasionar fissuras e deformações prematuras no pavimento. Outro desafio é a homogeneização entre dois ligantes de idades distintas. O trabalho igualmente destaca os fatores de produção que interferem no grau de mistura entre o RAP, o ligante virgem e os agregados (Figura 2.3). A temperatura de produção exerce papel importante nesse processo, uma vez que influencia diretamente a trabalhabilidade e regulação da rigidez. O tempo de mistura, por sua vez, deve ser suficiente para assegurar o adequado revestimento dos agregados, tanto os virgens quanto os provenientes do RAP, e pelo ligante novo, proporcionando também a ativação do CAP envelhecido presente no material fresado.

Figura 2.3 - Fatores de produção que influenciam o grau de mistura entre o RAP e agregados virgens.



Fonte: (Sharma *et al.*, 2021).

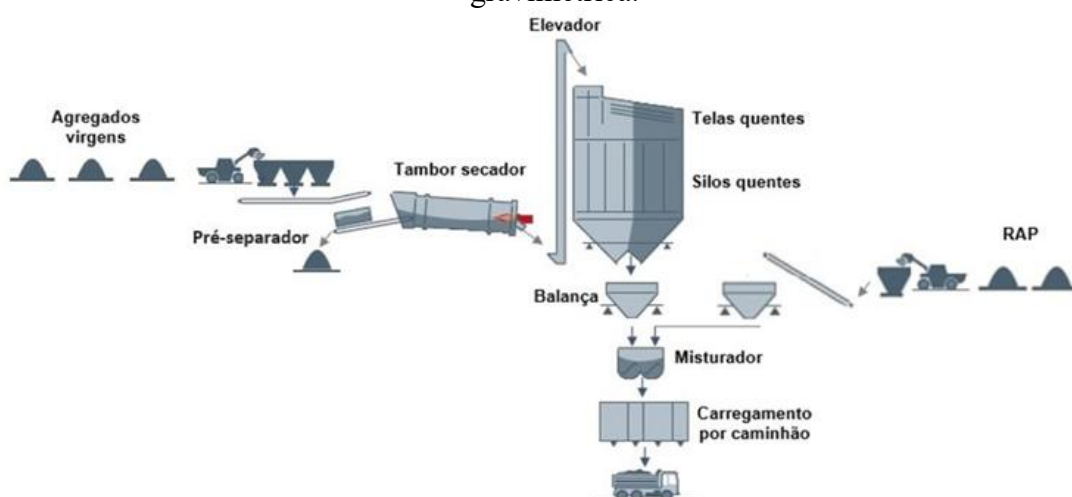
2.1.2 TIPOS DE USINAS ADAPTADAS PARA O USO DO RAP

A pesquisa de Chamouton (2024) relata que o material fresado não pode ser processado da mesma forma que os agregados virgens em usinas convencionais, visto que o contato direto com a chama no tambor secador causaria a combustão do ligante, liberando grande quantidade de gases e fumaça. Dessa forma, as usinas devem ser adaptadas para a produção das formulações recicladas com RAP.

Na norma DNIT ES 033 (2021) tem-se os procedimentos para a produção de mistura asfáltica com RAP, reciclada em usina, para execução do revestimento. Essa regulamentação as classifica como gravimétricas e contínuas, sendo que ambas podem ser adaptadas para incorporar o material reciclado. Nas gravimétricas, o RAP pode ser adicionado de forma fria, utilizando métodos como o do misturador, do elevador, e por anel de reciclagem. Na forma quente, quando há um tambor secador exclusivo para o aquecimento do material. Específico as usinas contínuas, o processo pode ocorrer por meio de sistemas como *drum-mixer* (tambor misturador), misturador *pugmill* ou tambor duplo, com a inserção do fresado a frio ou quente, conforme o tipo de aquecimento e a tecnologia empregada.

Na metodologia trabalhando com o misturador, o RAP é adicionado frio e com baixo teor de umidade por meio do funil de pesagem, atuando como um material complementar. Nesse processo, a transferência de calor acontece por condução durante o ciclo de mistura a seco, tanto na caixa de pesagem como no misturador. Em tal configuração, o percentual de material reciclado normalmente não ultrapassa 25% a 30%, e a umidade deve variar entre 3% a 5%, porquanto torna-se difícil elevar a temperatura dos agregados para aproximadamente 315°C devido às limitações do secador. Essa disposição é mostrada na Figura 2.4 (Suzuki, 2019). Destaca-se que a maneira como o RAP é colocado na usina influencia tanto o percentual máximo que pode ser inserido quanto na qualidade da composição final. A incorporação do material reciclado a frio, ou seja, à temperatura ambiente, gera maior quantidade de fumaça, e consumo de combustível, bem como o tempo é mais prolongado para a mistura atingir a temperatura ideal (Sharma *et al.*, 2022).

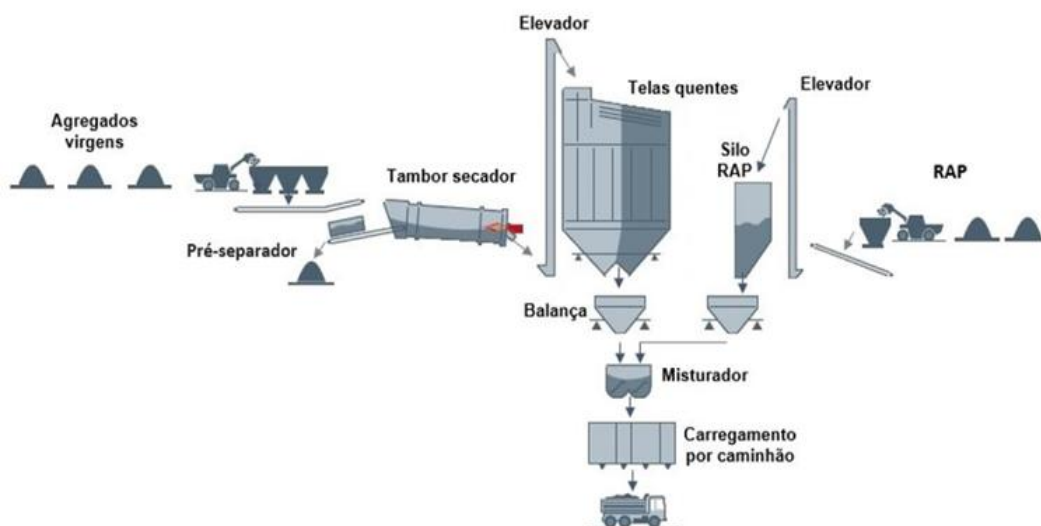
Figura 2.4 - Adição de RAP (frio e com baixo teor de umidade) no misturador de uma usina gravimétrica.



Fonte: (Suzuki, 2019).

Suzuki (2019), em complemento descreve que o método do elevador consiste na adição do RAP, na condição fria e com baixo teor de umidade, pela entrada inferior desse sistema de elevação. Nesse arranjo, o material fresado é incorporado aos agregados virgens superaquecidos durante sua transferência do secador para o elevador, podendo ainda ser adicionado por meio de um segundo ascensor. No entanto, nesse sistema, o percentual de RAP geralmente não excede 20%, uma vez que o curto trajeto percorrido pelo material até o elevador não permite a secagem completa antes de passar pelas telas, o que poderia resultar em entupimentos e segregação da mistura. A Figura 2.5 mostra como ocorre a entrada de RAP.

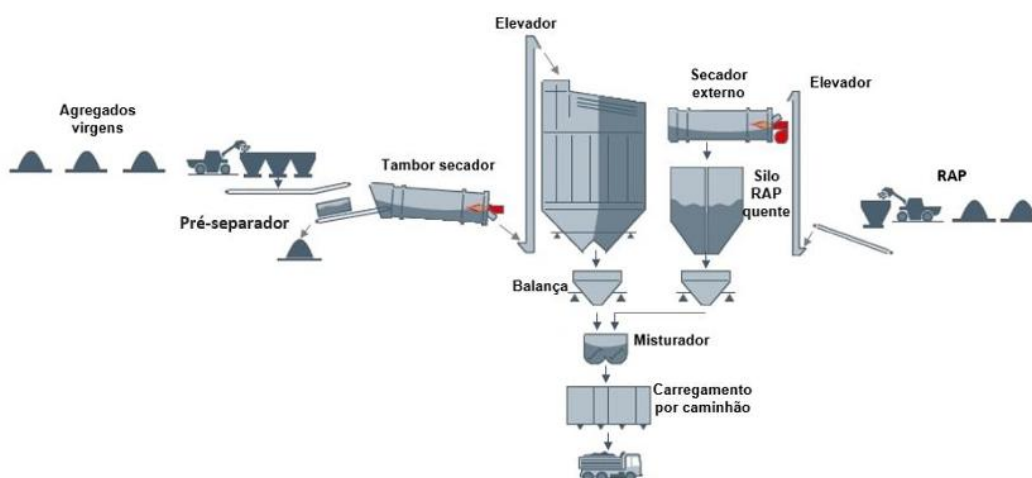
Figura 2.5 - Entrada de RAP (frio e com baixo teor de umidade) na parte inferior do elevador em uma usina gravimétrica.



Fonte: (Suzuki, 2019).

Para elevar o percentual de RAP acima de 25%, pode-se adicionar um secador exclusivo para o material fresado. Uma técnica difundida na Europa Ocidental nos anos 90 consistia na instalação de um secador externo de fluxo paralelo, no qual o resíduo era aquecido por convecção. Os gases resultantes, contendo vapor e hidrocarbonetos, eram direcionados para o secador de agregados virgens, permitindo a queima dos compostos na zona de combustão. O material aquecido era então armazenado em um silo quente independente, dotado de sistema de pesagem próprio, antes de ser enviado ao misturador. Esse modelo (Figura 2.6) possibilita atingir até 60% de incorporação de material reciclado desde que o queimador do secador principal tenha capacidade para processar os gases gerados pelo aparelho de secagem secundário (Suzuki, 2019).

Figura 2.6 - Configuração de usina gravimétrica com secador externo para pré-aquecimento do RAP.

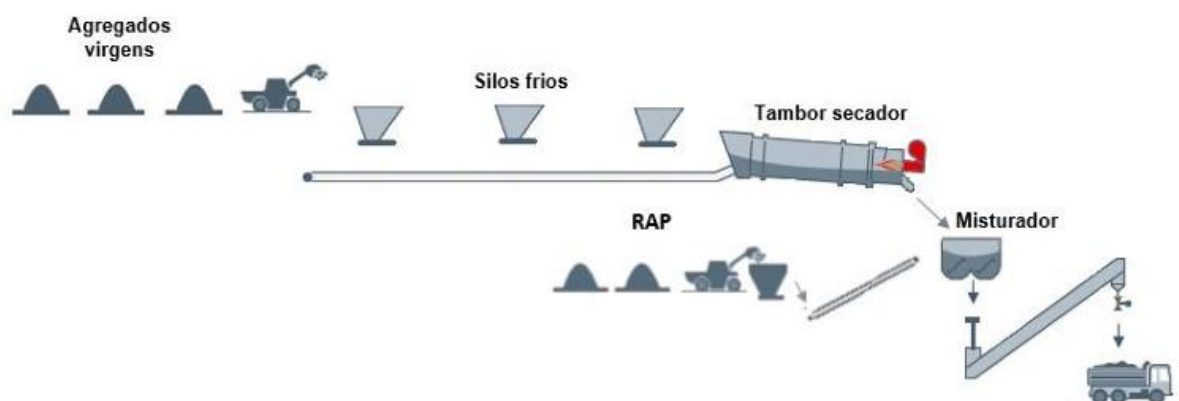


Fonte: (Suzuki, 2019).

As usinas de mistura contínua, operam em fluxo constante, com pesagem automática dos agregados por meio de correias e aquecimento em tambor secador-misturador de fluxo paralelo ou contrafluxo. O aquecimento do RAP neste sistema pode ocorrer por três modos distintos de transferência de calor: indireto (apenas pelos gases de exaustão), por convecção (com ar quente de combustão completa) ou por condução e convecção combinadas, quando o RAP é inserido na região central do tambor e aquecido pelo contato com agregados virgens superaquecidos e pelos gases. Essas variações permitem diferentes arranjos de incorporação, como os sistemas de fluxo paralelo, contrafluxo, tambor duplo e misturador contínuo (Suzuki, 2019).

Entre as configurações possíveis, destaca-se o misturador contínuo acoplado a um secador de contrafluxo, no qual o RAP é adicionado frio e com baixa umidade diretamente no misturador externo do tipo *pugmill*. Nesse arranjo, o teor de material reciclado é limitado principalmente pela dimensão do misturador e pelo tempo disponível para homogeneização entre o RAP frio e os agregados virgens aquecidos, como mostra a Figura 2.7 (Suzuki, 2019).

Figura 2.7 - Configuração da entrada de RAP em um misturador contínuo ao secador de contrafluxo.



Fonte: (Suzuki, 2019).

2.1.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

Zubaran (2014) averiguou metodologias para produção de formulações recicladas, analisando dois processos: quentes (em laboratório) e mornas (em usina). Constatou que quanto maiores a porcentagem de RAP e de agente rejuvenescedor, relativo ao total de ligante virgem, maior é a homogeneização. Ademais, identificou que os produtos fabricados em usina apresentaram menor rigidez alusivas as produzidas em laboratório, com base nos resultados dos ensaios de Tração Indireta (RT) e Módulo de Resiliência (MR). Similarmente, todas as concepções obtiveram dano por umidade induzida abaixo do recomendado, entretanto, as composições com RAP reduziram a suscetibilidade à ação deletéria da água. Esse comportamento está em consonância com a pesquisa de Yang *et al.* (2021), que cita a diminuição da suscetibilidade à umidade advinda da incorporação do material reciclado. Além disso, o autor registrou a redução da capacidade de fissuração e o desempenho da vida de fadiga, e, em contrapartida, aumento da resistência à deformação permanente.

Suzuki (2019) expõe que, embora a lógica sugira que maiores teores de material reciclado nas misturas asfálticas resultem em benefícios econômicos e ambientais, é crucial avaliar o desempenho dessas composições para conhecer as propriedades e, assim, possibilitar uma comparação com as convencionais. A autora ressalta que, a porcentagem de RAP utilizável

na formulação final é influenciada por fatores limitantes, como as particularidades do material fresado e o tipo de usina disponível para a fabricação.

Luzzi (2019) analisou a possibilidade de produzir misturas asfálticas recicladas em usina de produção volumétrica e a influência do RAP. Foram realizados ensaios de Módulo de Resiliência (MR) e Resistência à Tração (RT). Observou que os valores desses parâmetros aumentam proporcionalmente à quantidade de material fresado inserido, resultando em materiais mais rígidos. O trabalho considera a reciclagem do asfalto como positiva nos aspectos ambiental, técnico e econômico. Em outra vertente, na pesquisa de Mulatu, Yigezu e Geremew (2021), o valor do Índice de Resistência à Tração diminuiu com o aumento das proporções de asfalto recuperado, como mostra a Tabela 2.1, porém atendeu às especificações e mostrou boa resistência a danos por umidade induzida. Os pesquisadores afirmam também que as análises laboratoriais indicam, na condição de agregado na mistura quente, o teor máximo de incorporação do RAP igual a de 45%.

Tabela 2.1 – Resumo dos resultados da Resistência à Tração

TEOR DE RAP (%)	TEOR ÓTIMO DE BETUME (%)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA (kPa)		RAZÕES DA RT (%)
		NÃO CONDICIONADO	CONDICIONADO	
0%	5.10	760.0	699.6	92.05
5%	5.04	750.9	684.5	91.16
15%	4.98	717.8	646.2	90.03
25%	4.87	708.2	625.1	88.27
35%	4.81	695.7	604.1	86.83
45%	4.74	673.7	575.5	85.42

Fonte: Adaptado de Mulatu, Yigezu e Geremew (2021).

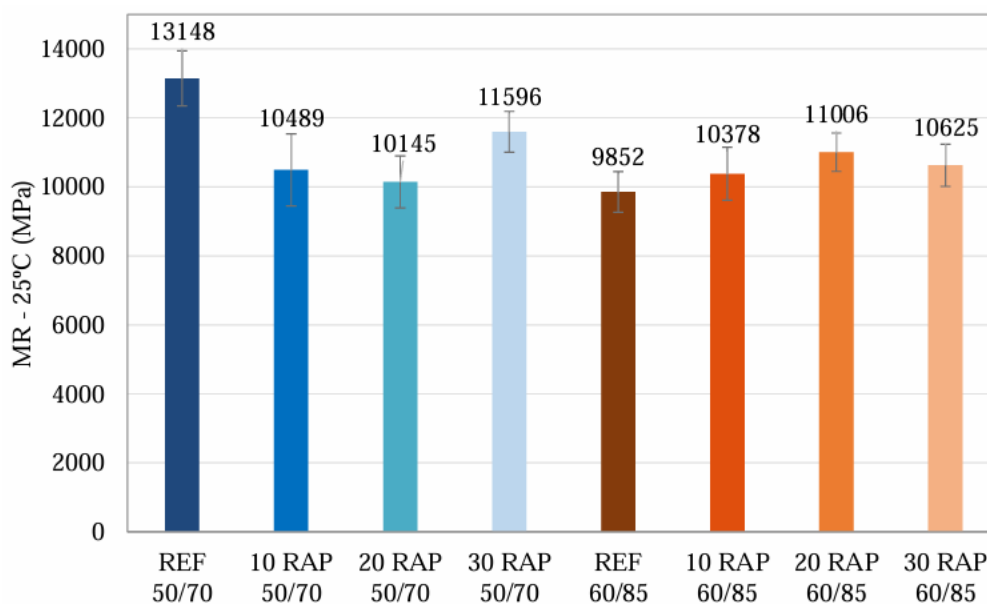
Com base nos estudos experimentais de Oliveira, Farias e Silva (2022), concernente a misturas asfálticas recicladas a quente com teores de RAP de 25%, 45% e 100%, evidenciou-se que a adição de material reciclado aumenta o Módulo de Resiliência. Em particular, a composição com 100% de RAP atingiu valor de MR mais elevado (11.441,33 MPa), seguida pela mistura com 45% de RAP (5.360,4 MPa) e pela de 25% de RAP (4.224,29 MPa). Esses valores comprovam uma relação diretamente proporcional entre o teor de asfalto reciclado incorporado e a rigidez da composição, atribuída à presença do ligante envelhecido e oxidado no material reciclado. Verificou-se inclusive que a mistura com 100% RAP, por apresentar

maior rigidez, também demonstrou valores superiores de coesão, Resistência à Tração, desgaste, Módulo de Resiliência e Módulo Dinâmico em comparação com as demais. Adicionalmente, as formulações estudadas enquadraram-se nos limites mínimos e máximos recomendados por normas para os parâmetros de Vv (Volume de vazios), massa específica e densidade aparente.

Barroso (2025) investigou o comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas a quente com teores de 15%, 25% e 35% de RAP, associados ao uso de asfalto modificado por borracha. Por meio dos resultados, constatou que há um aumento no Módulo de Resiliência à medida que se eleva a quantidade de fresado incorporado, sendo o maior valor desse parâmetro na composição com 35% de RAP, o que indica maior rigidez das formulações conforme a adição do material fresado. O autor enfatiza que, quanto ao comportamento mecânico, todas as misturas atenderam aos limites mínimos e máximos normatizados.

Correa (2020) estudou a influência do RAP no comportamento mecânico das misturas asfálticas. Para isso, trabalhou com oito formulações distintas: quatro com ligante 50/70 e RAP da fonte 1, e quatro com ligante 60/85 e RAP da fonte 2, todas com os teores incorporação 0%, 10%, 20% e 30%. A investigação constatou que o desempenho foi influenciado tanto pela quantidade quanto pelo tipo de cimento asfáltico de petróleo virgem. Nas misturas com ligante 50/70, o aumento da quantidade de resíduo gerou redução do Módulo de Resiliência. Por outro lado, nas composições com ligante 60/85, a adição do material fresado elevou os valores desse parâmetro, confirmando que o material fresado tende a aumentar a rigidez (Figura 2.8). Entretanto, também observou um decréscimo do MR com 30% de RAP relativo à formulação contendo 20% RAP, sendo atribuído à origem do asfalto reciclado e o ligante residual presente. Quanto aos resultados de Resistência à Tração por compressão diametral, a pesquisa mostrou seu acréscimo com o aumento das proporções de RAP.

Figura 2.8 - Resultados de todas as misturas obtidos no ensaio de MR.



Fonte: (Correa, 2020).

2.2 Aplicação em campo de misturas recicladas com RAP

Grande parte das pesquisas sobre misturas asfálticas recicladas concentra-se em avaliações de laboratório, nas quais os corpos de prova são moldados sob condições controladas, que nem sempre reproduzem a produção em usina, na compactação em pista e a exposição ao tráfego e condições climáticas. São ainda escassos na literatura os trabalhos que avaliam a execução de trechos experimentais e o desempenho de misturas com RAP em condições de serviço. Contudo, estudos como o realizado por Oliveira (2013) tornam-se referências importantes. O autor avaliou o comportamento de composições asfálticas recicladas em laboratório e em campo e constatou que os valores dos ensaios mecânicos aumentam à medida que eleva o teor de material fresado, nos dois cenários, ainda que de forma mais atenuada nas amostras de campo. O pesquisador observou também, que a incorporação do RAP proporciona economia de até 45% no consumo de CAP virgem e de até 50% no de agregados convencionais.

Suzuki (2019) investigou as propriedades mecânicas de misturas asfálticas com diferentes teores de material fresado para aplicação em revestimento. Além da análise laboratorial, também foram construídos trechos experimentais com dosagens constituídas de 25% de RAP sem e com AR (agente rejuvenescedor) e 35% de RAP + AR, e um trecho controle. A autora destacou a importância de utilizar usinas adaptadas compatíveis com o teor de umidade do RAP para garantir aquecimento adequado e trabalhabilidade da composição reciclada.

Em complemento, o citado estudo evidencia que o desempenho dessas formulações com RAP está diretamente relacionado às condições da estrutura do pavimento, especialmente a base e o subleito, sendo essencial que estas camadas se mantenham íntegras para assegurar o bom comportamento do revestimento. No acompanhamento qualitativo das seções experimentais, não foram observados defeitos superficiais no revestimento, sendo sugerido que sejam realizadas avaliações estruturais periódicas e a longo prazo. O trabalho afirma igualmente que a utilização de misturas recicladas a quente é uma técnica promissora para a sustentabilidade na pavimentação.

Chamouton (2024), deu continuidade à pesquisa de Suzuki (2019), realizando o monitoramento em campo, no período de 2018 a 2023. O autor conduziu ensaios de irregularidade longitudinal (IRI), deflexão (FWD), macrotextura (MPD e HS), afundamento de trilha de roda (ATR) e área trincada (%TR). Os resultados de irregularidade longitudinal mostraram evoluções similares para os trechos de 25% de RAP, com e sem AR, e o controle, indicou bom desempenho das composições com material fresado. Os valores de deflexão não apresentaram mudanças significativas no período observado, demonstrando comportamento satisfatório das formulações com o resíduo em relação às de controle. Os dados de afundamento de trilha de roda apresentam valores médios semelhantes para os trechos estudados após cinco anos de monitoramento, porém com maiores desvios padrão nos segmentos com RAP. Quanto à macrotextura, todos os trechos mostraram características similares, indicando que a segurança viária relacionada a esse parâmetro não foi comprometida pela incorporação do material reciclado. Entretanto, os trechos com 25% de RAP, com e sem AR, exibiram área trincada aproximadamente cinco vezes superior alusivo ao trecho controle.

O mencionado trabalho também analisou amostras coletadas das misturas executadas em campo e realizou ensaios laboratoriais. Constatou que a resistência à tração das composições com 25% de RAP, com e sem AR, mostrou-se superior à da composição com 35% de RAP + AR. Com relação ao Módulo de Resiliência, os valores para todas as dosagens com fresado foram mais elevados, sendo a mistura com 35% de RAP + AR a mais rígida. Na avaliação do Módulo Dinâmico, a formulação com 25% de RAP + AR registrou valores superiores em baixa frequências (altas temperaturas) em comparação ao teor de 25% de RAP sem AR. No ensaio de *Flow Number*, a composição com 35% de RAP + AR demonstrou maior resistência à deformação permanente, enquanto a com 25% de RAP + AR apresentou resultado inferior à de 25% de RAP sem AR. Nos ensaios de fadiga, a dosagem com 25% de RAP + AR mostrou ser mais resistente referente a de 35% de RAP + AR. A investigação concluiu que composições

com até 25% de RAP, com ou sem AR, proporcionaram desempenho satisfatório comparadas à mistura controle.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Neste capítulo, são apresentadas informações sobre os materiais empregados na pesquisa, os quais compreendem: agregados convencionais, agregado reciclado (RAP) e ligante asfáltico virgem. São representativos dos materiais tipicamente utilizados na pavimentação da região em estudo. Tais informações sobre os materiais constitui etapa fundamental para a investigação, pois permite analisar o comportamento individual de cada componente. A partir dela, obtêm-se parâmetros de referência que subsidiam a compreensão das interações entre os materiais e de sua influência no desempenho final das misturas asfálticas.

3.1.1 AGREGADOS CONVENCIONAIS E CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP)

De acordo com a norma DNIT ME 413 (2021), classifica-se como agregado graúdo as partículas que passam na peneira de 75 mm e ficam retidas na peneira de 4,75 mm. O agregado miúdo, segundo a norma DNIT ME 411 (2021), compreende as partículas que atravessam a peneira 4,75 mm e são retidas na peneira 0,075 mm. Já o filer é definido como o material que passa integralmente na peneira nº 200 (0,075 mm).

Com base nessa classificação, as misturas asfálticas foram formuladas a partir de quatro componentes: agregado graúdo, agregado miúdo, filer e material fresado (RAP — Reclaimed Asphalt Pavement). O agregado graúdo, de origem granítica, foi proveniente da Mineração Rio Norte, localizada no município de Barcelos, a 405 km de Manaus. O agregado miúdo, consiste em areia natural, comercializada na região e amplamente empregado na pavimentação regional, e o filer é proveniente de resíduo do agregado graúdo. Por fim, o RAP utilizado é proveniente da fresagem de revestimentos asfálticos executados na cidade de Manaus. Para cada teor de RAP avaliado (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40%) foram estabelecidas proporções específicas de agregado graúdo e agregado miúdo, de modo que a mistura resultante atendesse aos requisitos granulométricos da Faixa C-12,5, conforme preconiza a norma DNIT ES 031 (2006).

Quanto ao ligante asfáltico, empregou-se o cimento asfáltico de petróleo (CAP) virgem distribuído pela Refinaria de Manaus S.A. (REAM), anteriormente denominada Refinaria Isaac

Sabbá (REMAN). Este ligante é adotado pela empresa parceira na produção de concreto asfáltico destinado a obras de pavimentação viária. A escolha por esse específico CAP justifica-se por sua ampla disponibilidade no âmbito local e por constituir o ligante convencional de referência na região.

3.1.2 RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP)

O material fresado (*Reclaimed Asphalt Pavement* - RAP) usado nas composições foi obtido por meio do processo de fresagem de revestimentos asfálticos antigos ou deteriorados. A operação foi realizada com o auxílio de uma fresadora a frio modelo WIRTGEN W200, pertencente à empresa colaboradora. O equipamento conta com mecanismos dotados de tecnologia avançada, destacando-se o sistema automático MILL ASSIST, que otimiza a produtividade, reduz o consumo de combustível, as emissões de CO₂ por metro cúbico de material fresado e o nível de ruído durante a operação.

O RAP resultante apresenta características heterogêneas, porquanto são provenientes de revestimentos diferenciados, sendo constituída por agregados revestidos por ligante asfáltico envelhecido. Sua incorporação em novas misturas asfálticas requer atenção pela presença desse material asfáltico, bem como à distribuição granulométrica dos agregados, fatores que exercem influência direta no desempenho da formulação asfáltica. O processo de obtenção do RAP encontra-se ilustrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Processo de obtenção do RAP



Fonte: Próprio autor, 2026.

3.2 Métodos

3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para compreender a natureza dos materiais que compõem as formulações asfálticas, foi conduzida uma investigação empregando os métodos de caracterização, as quais incluem análises químicas, mineralógica, físicas e reológicas. Dessa forma, foi possível identificar a composição elementar e mineral, as propriedades físicas e o comportamento reológico dos componentes. A correlação entre esses dados permite relacionar diretamente as características dos materiais, o desempenho mecânico e a durabilidade das misturas asfálticas em condições de serviço.

3.2.1.1 Agregados e Cimento Asfáltico de Petróleo

A caracterização dos agregados miúdos e graúdos procedeu-se por meio da granulometria por peneiramento, acompanhando a normativa DNIT ME 412 (2019). Essa etapa resulta na curva granulométrica, que representa a relação entre as aberturas das peneiras e a porcentagem de material retido ou passante. Paralelamente, determinaram-se a densidade relativa real (G_{sa}) e a densidade relativa aparente (G_{sb}). Para os agregados miúdos, o ensaio acompanhou a orientação DNIT ME 411 (2021), sendo os parâmetros calculados pelas equações 3.1 e 3.2. Para o agregado graúdo, utilizou-se a norma DNIT ME 413 (2021), com valores determinados pelas Equações 3.3 e 3.4.

$$G_{sa} = \frac{A}{A + B - C} \quad (3.1)$$

$$G_{sb} = \frac{A}{B1 + B - C} \quad (3.2)$$

Onde:

G_{sa} – densidade relativa real do agregado;

G_{sb} – densidade relativa aparente do agregado miúdo;

A – massa da amostra seca em estufa (g);

B – massa do picnômetro preenchido com água, até a marca de calibração (g);

B1 – massa da amostra na condição saturado com superfície seca (g);

C – massa do picnômetro com a amostra e preenchido com água até a marca de calibração.

$$G_{sa} = \frac{A}{A - C} \quad (3.3)$$

$$G_{sb} = \frac{A}{B - C} \quad (3.4)$$

Onde:

G_{sa} – densidade relativa real dos grãos de agregado;

G_{sb} – densidade relativa aparente do agregado;

A – massa da amostra, seca em estufa (g);

B – massa da amostra, na condição saturada com superfície seca, no ar (g);

C – massa imersa da amostra, saturada, em água (g).

Complementarmente, analisaram-se a morfologia e a composição elementar da areia e do BGS (Brita Graduada Simples) por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando o equipamento TESCAN VEGA3 em conjunto com a Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS), modelo OXFORD Instruments X-act. A aquisição das imagens e dos espectros elementares foi realizada no Laboratório Temático de Microscopia e Nanotecnologia (LTMN) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA).

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada à Espectroscopia por Energia de Dispersão (EDS), configura-se como uma técnica complementar para a caracterização de materiais. Por meio do MEV, obtêm-se imagens de alta resolução que permitem a análise visual da morfologia das partículas. Concomitantemente, o sistema EDS possibilita a identificação dos elementos químicos e baseia-se na detecção dos fótons de frequência específica emitidos por cada elemento quando o feixe de elétrons do microscópio colide com a amostra, o que proporciona uma investigação qualitativa e quantitativa (Linhares, 2022).

Figura 3.2 - Caracterização dos agregados e do RAP por MEV e EDS



Fonte: Próprio autor, 2026.

A caracterização do CAP foi conduzida conforme a metodologia estabelecida pela diretriz DNIT EM 095 (2006), em conformidade com as especificações da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), previstas na Resolução nº 19, de 2005. Essa instrução normativa define as especificações dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP) comercializados no território nacional.

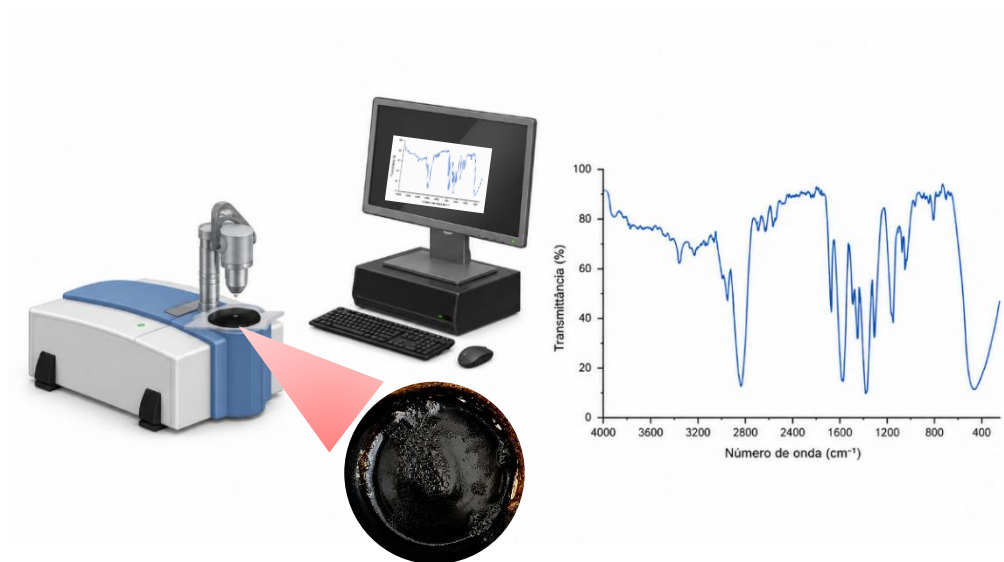
3.2.1.2 *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*

Análise do RAP iniciou-se com a extração do ligante asfáltico envelhecido, realizado por centrifugação no equipamento Rotarex, empregando tricloroetileno como solvente, conforme dispõe DNER ME 053 (1994). Esse procedimento permitiu a determinação do teor de ligante e a recuperação dos agregados constituintes do RAP.

Os agregados obtidos nesse processo foram submetidos ao ensaio granulométrico para a determinação da distribuição dos grãos. Quanto ao ligante asfáltico extraído, após a completa remoção do solvente, foi analisado por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) (Figura 3.3) no Laboratório de Polímeros Nanoestruturados (NANOPOL) da Universidade Federal do Amazonas. Complementarmente, uma amostra do RAP na condição triturado em pó foi estudada quanto à morfologia e composição elementar por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada à Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS).

Esta etapa foi conduzida no Laboratório Temático de Microscopia e Nanotecnologia (LTMN) do INPA, conforme descrito no item 3.2.1.1.

Figura 3.3 - Ensaio de FTIR no ligante do RAP



Fonte: Próprio autor, 2026.

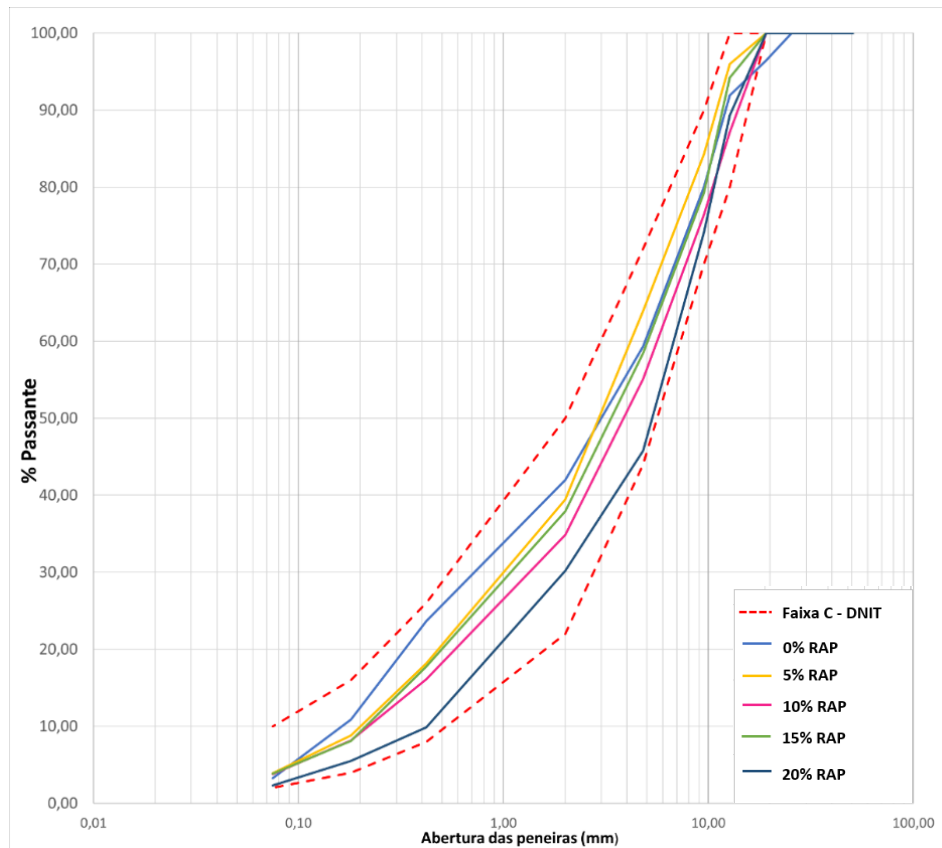
3.2.2 PRODUÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Esta seção descreve o procedimento adotado para a produção das misturas asfálticas recicladas a quente, desde a fase da dosagem até a confecção dos corpos de prova. Nesta etapa da investigação compreendeu a definição das formulações com diferentes teores de RAP, a fabricação das misturas em usina e a consequente coleta e moldagem dos corpos de prova para efetivação dos ensaios mecânicos.

3.2.2.1 Dosagem

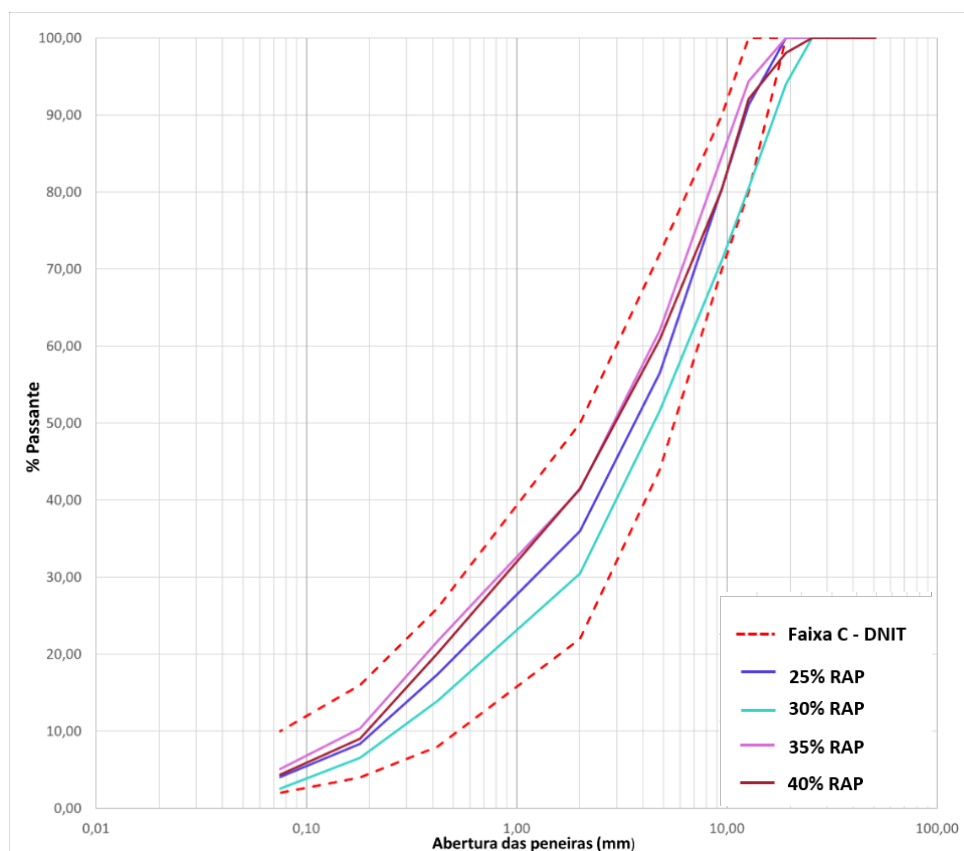
A formulação das misturas baseou-se na dosagem padrão, adotada pela empresa parceira nas vias urbanas de Manaus, conforme o método Marshall (DNER ME 043, 1995). Com o teor de CAP fixo, variaram-se as proporções de RAP em 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40%, ajustando-se os agregados em cada caso. Todos os parâmetros granulométricos seguiram a Faixa C-12,5 (DNIT ES 031, 2006), resultando em nove formulações adaptadas da composição original pela incorporação do material reciclado. As curvas granulométricas das misturas com teores de RAP variando de 0% a 20% estão apresentadas na Figura 3.4, e aquelas com teores de 25% a 40% estão ilustradas na Figura 3.5

Figura 3.4 - Curvas granulométricas, misturas com RAP de 0% a 20%



Fonte: Próprio autor, 2026.

Figura 3.5 - Curvas granulométricas, misturas com RAP de 25% a 40%



Fonte: Próprio autor, 2026.

Em todas as proporções, foi possível ajustar a distribuição granulométrica dentro dos limites previstos pela Faixa C. O aumento progressivo do teor de RAP impõe ajustes nas proporções dos demais agregados, especialmente na fração miúda, em razão do perfil granulométrico do material fresado.

3.2.2.2 Preparação das misturas em usina

A produção do concreto asfáltico, a cargo da organização colaboradora, é realizada por meio de uma usina de asfalto contínua do tipo móvel, modelo ACM Prime 2.0 da AMMANN (Figura 3.6). O emprego dessa tecnologia, em contraste com os modelos mais difundidos no mercado, introduz soluções operacionais com ganhos ambientais significativos. Sua principal contribuição reside na capacidade de incorporar até 40% de material fresado (RAP) à mistura, aliada a um menor consumo energético e à redução de emissões de CO₂ no processo produtivo (AMMANN, 2025).

Figura 3.6 - Usina ACM Prime 2.0 da AMMANN.



Fonte: (AMMANN, 2025).

A operação da usina é controlada por meio de uma cabine de comando automatizada. O processo de produção do concreto asfáltico inicia-se com a estocagem e a alimentação dos agregados naturais, ainda em temperatura ambiente, nos silos de dosagem a frio. Na sequência, os materiais são transportados por esteira até o tambor secador, onde são submetidos ao aquecimento. Após essa etapa, o fluxo segue para o misturador, no qual ocorre a adição do material fresado (RAP), em condição fria, e do ligante asfáltico virgem, promovendo-se a homogeneização da composição a temperaturas entre 155 °C e 175 °C. Finalizada a mistura, o concreto asfáltico é elevado a um silo de armazenamento temporário, de onde é vertido diretamente nos caminhões para transporte até o local de aplicação. Ao longo de todo esse processo produtivo, a temperatura da mistura é monitorada continuamente, garantindo-se que não exceda o limite de 175 °C, de modo a preservar as propriedades reológicas do ligante asfáltico e assegurar a qualidade final do material.

3.2.2.3 Confecção dos corpos de prova

Após a produção do concreto asfáltico na usina, procedeu-se a coleta de amostras para moldagem dos corpos de prova em laboratório (Figura 3.7). Adotou-se o método de compactação Marshall, de acordo com as diretrizes da norma DNIT PRO 178 (2018). Para cada teor de RAP, foram moldados seis CP's, seguindo a sequência descrita a seguir:

1. Coleta e preparação: coletou-se uma amostra de aproximadamente 1200g de concreto asfáltico produzido na usina, quantidade adequada para moldagem de um corpo de prova com diâmetro de $101,6 \text{ mm} \pm 3,8 \text{ mm}$ e altura entre 35 mm e 70 mm;
2. Compactação: a amostra foi densificada em um compactador Marshall automático, aplicando-se 75 golpes por face;
3. Resfriamento e desmolde: concluída a etapa anterior, o corpo de prova permaneceu em repouso por algumas horas para resfriamento, visando prevenir danos estruturais durante a remoção do molde.

A composição asfáltica de tais corpos de prova, moldados em agosto de 2024, foi aplicada na construção do trecho investigado. Tal metodologia viabiliza a análise da correlação entre os resultados de laboratório e o desempenho *in situ* do revestimento.

Figura 3.7 - Confeção dos corpos de prova de laboratório



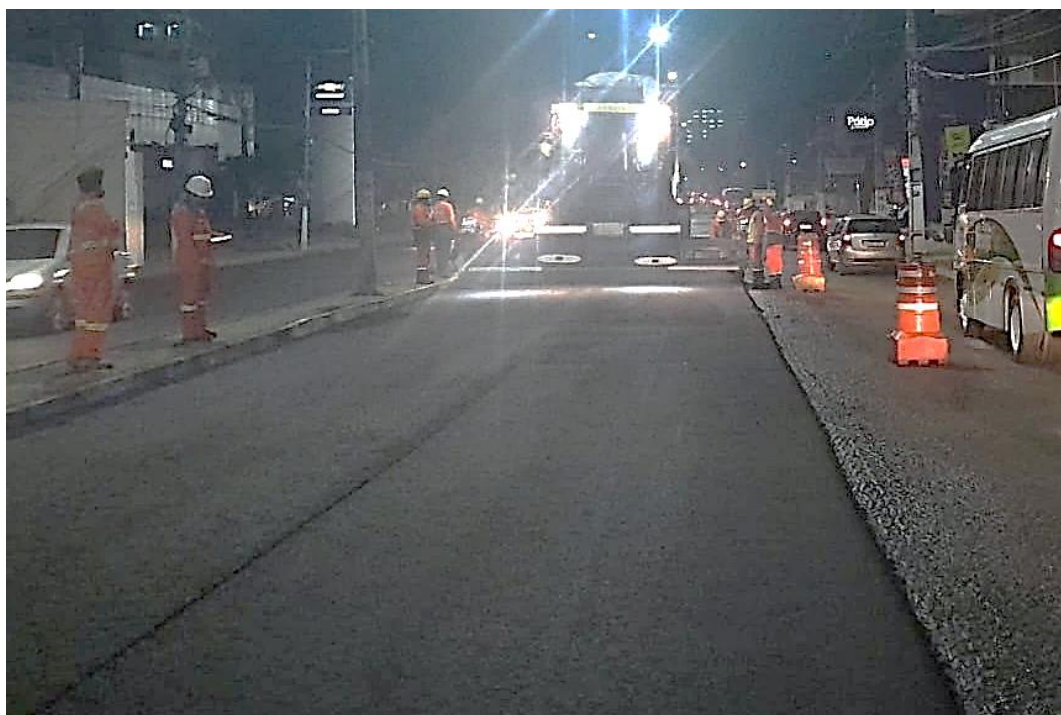
Fonte: Próprio autor, 2026

3.2.3 TRECHO EXPERIMENTAL

Aproveitando a janela de oportunidade aberta por uma obra de recuperação funcional programada pela empresa parceira na Avenida Constantino Nery, concebeu-se um experimento em escala real para avaliar o desempenho mecânico de misturas asfálticas incorporando diferentes teores de material fresado (RAP). A intervenção, que consistiu na fresagem e recomposição do revestimento asfáltico com espessura de 5 cm, permitiu a execução de oito segmentos-monitorados. Nestes trechos, foram aplicadas misturas com teores crescentes de RAP, especificamente 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40%, visando investigar o comportamento *in situ* do pavimento submetido a diferentes percentuais de material reciclado.

O processo executivo iniciou-se com o transporte da mistura asfáltica da usina até o local de aplicação, empregando-se caminhões basculantes com carrocerias protegidas por lonas, e devidamente identificados pelo teor de RAP. Este procedimento visou minimizar as perdas de temperatura e resguardar o material contra intempéries, como vento e chuva, durante o deslocamento. Previamente à aplicação, procedeu-se à preparação da superfície por meio da limpeza minuciosa da base existente, com o intuito de remover materiais soltos e contaminantes que pudessem comprometer a aderência. Na sequência, executou-se a pintura de ligação utilizando emulsão asfáltica, aplicada com espargidor automático, assegurando a adequada ligação entre a camada de base e o novo revestimento. O espalhamento do concreto asfáltico foi realizado por intermédio de uma vibroacabadora, enquanto a compactação ocorreu em duas etapas complementares: inicialmente com rolo compactador de pneus, seguido por rolo liso. Esta combinação de equipamentos teve por objetivo, respectivamente, conferir a compactação preliminar e a densificação final, além de garantir a uniformidade e o acabamento superficial do pavimento. A Figura 3.8 ilustra a execução do revestimento asfáltico da via.

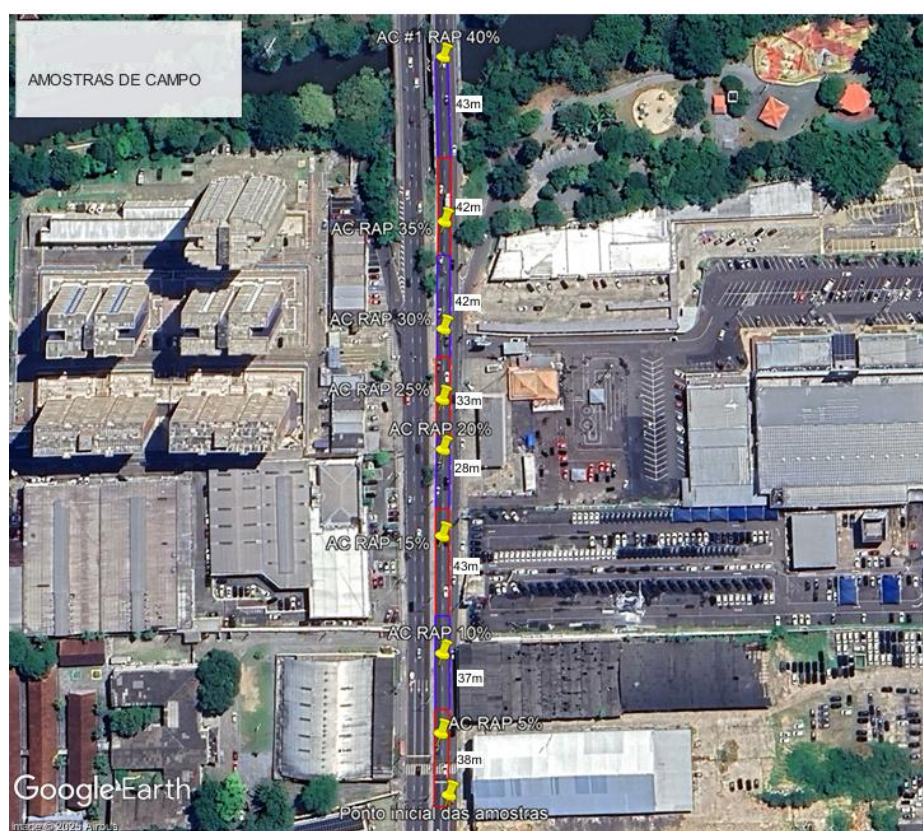
Figura 3.8 - Execução da camada asfáltica com vibroacabadora no trecho experimental



Fonte: Próprio autor, 2026.

Decorrido um ano da execução dos trechos experimentais (Figuras 3.9 e 3.10), procedeu-se à extração de corpos de prova de cada segmento monitorado, para subsequente caracterização em laboratório. Foram extraídos três corpos de prova por segmento, com exceção do trecho correspondente à mistura com 40% de RAP. Neste caso específico, a extração foi inviabilizada pela coincidência da localização do trecho com uma ponte metálica, cuja estrutura impôs restrições físicas que impossibilitaram a obtenção de corpos de prova com as dimensões mínimas exigidas para a realização dos ensaios programados. A localização dos pontos de extração em cada segmento encontra-se representada na Figura 3.9.

Figura 3.9 - Localização das amostras coletadas em campo.



Fonte: (Próprio autor, 2026).

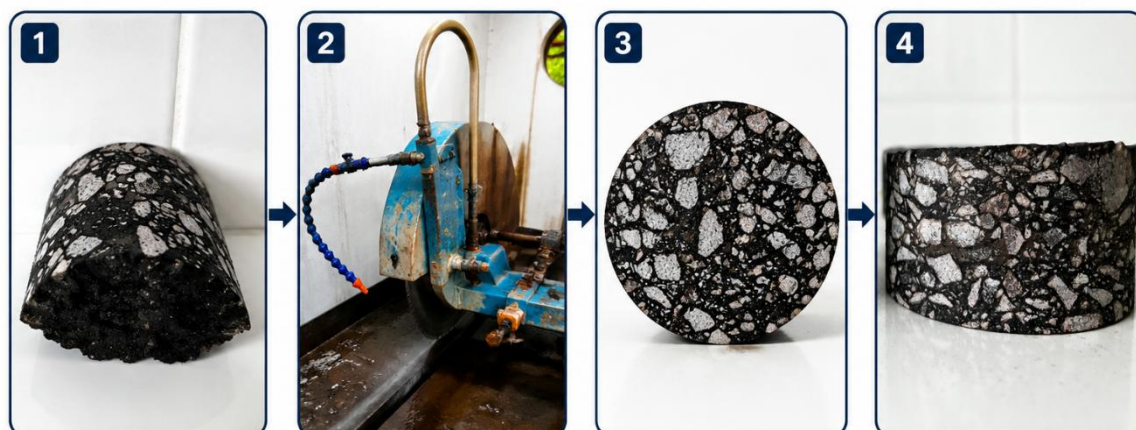
Figura 3.10 - Extração dos corpos de prova do campo



Fonte: (Próprio autor, 2026).

Após a extração, os testemunhos (amostras) possuem espessura variada, uma vez que podem englobar não apenas a última camada de revestimento executada, mas também camadas subjacentes aplicadas anteriormente. Ademais, as amostras extraídas, em regra, exibem superfícies irregulares, tornando necessário o corte para retificação das faces com intuito de adequá-las às condições requeridas pelos ensaios mecânicos, conforme mostra a Figura 3.11. O procedimento de corte permitiu ainda, ajustar a espessura dos corpos de prova para 5 cm, valor correspondente à espessura da camada de revestimento executada no trecho experimental desta pesquisa.

Figura 3.11 - Retificação dos corpos de prova de campo



Fonte: Próprio autor, 2026

Ao comparar os corpos de prova moldados em laboratório com os extraídos da via urbana, observam-se: as amostras de campo evidenciam maior desgaste superficial em relação aos de laboratório, o que pode ser atribuído ao atrito dos pneus dos veículos e ao intemperismo ao longo de um ano em serviço, resultando na maior exposição dos agregados na superfície, conforme mostra a Figura 3.12. Os corpos de prova de laboratório e de campo foram acondicionados e identificados, conforme ilustrado na Figura 3.13, para a realização dos ensaios mecânicos subsequentes.

Figura 3.12 - Corpo de prova de campo e de laboratório.



a) Corpo de prova de campo

b) Corpo de prova de laboratório

Fonte: Próprio autor, 2026

Figura 3.13 - Corpos de prova, laboratório e de campo



Fonte: Próprio autor, 2026

3.2.4 AVALIAÇÃO MECÂNICA

Para atingir os objetivos propostos, o plano experimental previa a realização dos ensaios de Resistência à Tração (RT) por compressão diametral, conforme a DNIT 136/2018-ME, e de Módulo de Resiliência (MR), conforme a DNIT 135/2018-ME. A logística e as autorizações especiais que tornaram a pesquisa factível impuseram uma limitação técnica severa: o número de corpos de prova era reduzido e finito, tanto para as misturas laboratoriais quanto, principalmente, para as amostras testemunho extraídas do trecho urbano.

Visando a análise comparativa entre os grupos experimental e de campo, todos os corpos de prova, laboratoriais e extraídos da via, foram submetidos à mesma condição de ensaio. Desta forma, a análise das tendências e das diferenças relativas entre os grupos permanece não apenas válida, mas estatisticamente adequada para atender aos objetivos propostos por este estudo único e inédito para a realidade dos pavimentos urbanos de Manaus.

3.2.4.1 Módulo de Resiliência e Resistência à Tração

O Módulo Resiliente (MR) constitui um dos parâmetros fundamentais para a caracterização mecânica de materiais asfálticos e para a análise estrutural de pavimentos flexíveis. Trata-se de uma medida da rigidez do material sob condições de carregamento que simulam o efeito dinâmico das cargas de tráfego, representando a relação entre a tensão aplicada e a deformação recuperável após sucessivos ciclos de carga e descarga. A sua importância reside na capacidade de quantificar a resposta elástica (recuperável) da mistura quando submetida a pulsos de carga repetidos, um parâmetro crítico para o desempenho do pavimento e para métodos de dimensionamento mecanístico-empírico. A sua determinação em laboratório ganhou especial relevância a partir do desenvolvimento de metodologias mecanístico-empíricas de dimensionamento de pavimentos, nas quais este parâmetro é utilizado como input para cálculos de tensões, deformações e deslocamentos na estrutura do pavimento quando submetida às solicitações do tráfego (Franco, 2007).

O Módulo Resiliente (MR) é definido como a tensão axial repetida pela deformação recuperável (ou resiliente) após a aplicação de um grande número de ciclos de carregamento. Matematicamente, pode ser expresso pela Equação 3.5, segundo a norma DNIT ME 135 (2018).

$$MR = \frac{P}{|\Delta H|t} (0,2692 + 0,9976\mu) \quad (3.5)$$

Onde:

MR – Módulo de resiliência, expresso em MPa;

P – carga cíclica, expresso em N;

ΔH – deslocamento horizontal (elástico ou resiliente), na interseção das duas tangentes, expresso em mm;

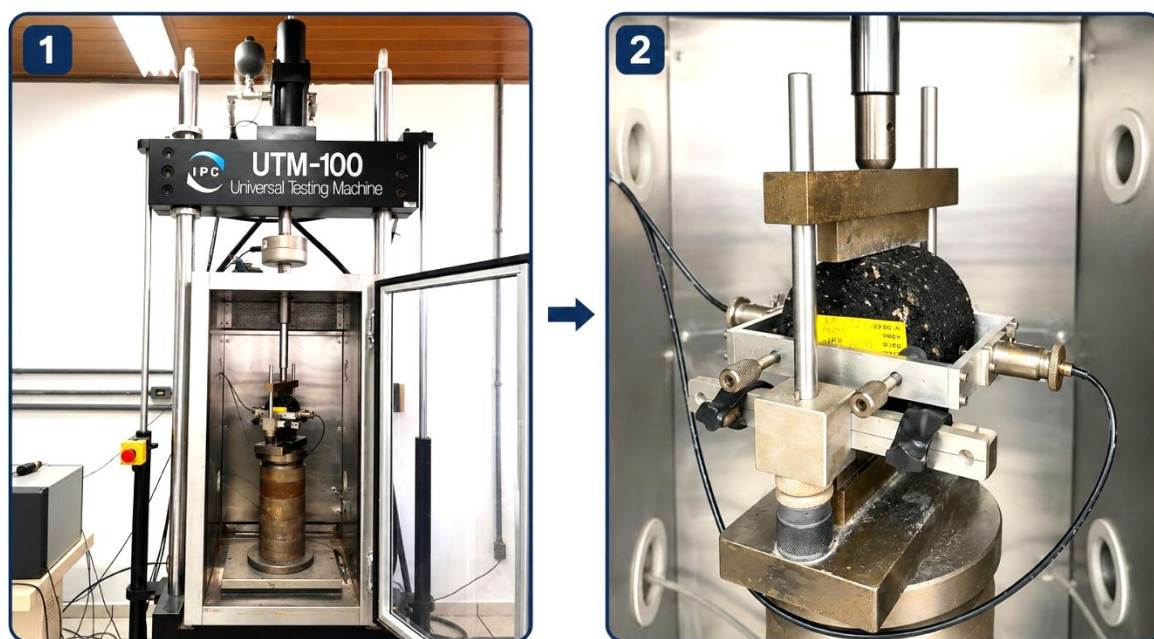
t – espessura (altura) do corpo de prova, expressa em mm;

μ – coeficiente de *Poisson*.

Os ensaios de Módulo Resiliente realizaram-se no Laboratório de Misturas Asfálticas do Grupo de Pesquisa em Geotecnia da Universidade Federal do Amazonas (GEOTEC – UFAM), por meio da prensa *Universal Testing Machine* (UTM-100) mostrado na Figura 3.14. Os parâmetros do teste e registro dos dados foram obtidos por dois transdutores diferenciais de deslocamento (LVDTs). O carregamento dinâmico foi aplicado segundo uma função haversine, caracterizada por pulsos de 0,1 segundo de duração, intercalados por intervalos de 0,9 segundo

de repouso. Para esta pesquisa, os corpos de prova foram moldados com dimensões médias iguais a 100 mm de diâmetro e 57 mm de altura. Ressalta-se que todos os corpos de prova foram ensaiados sob as mesmas condições, garantindo a consistência metodológica e a comparabilidade dos resultados entre as misturas, campo e laboratório, avaliadas no estudo.

Figura 3.14 - Corpo de prova durante o ensaio de Módulo de Resiliência.



Fonte: (Próprio autor, 2026).

O ensaio de Resistência à Tração realizou-se também no Laboratório de Misturas Asfáltica do Grupo de Pesquisa em Geotecnia da UFAM (GEOTEC), por meio da prensa *Universal Testing Machine UTM-100*), ilustrada na Figura 3.14, em conformidade com a norma DNIT ME 136 (2018). Determinou-se a RT por compressão diametral do conjunto dos corpos de prova, oriundos de laboratório e de campo, em condições de temperatura de 25°C. O resultado é expresso pela Equação 3.6.

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (3.6)$$

Onde:

σ_R – resistência à tração, à temperatura do ensaio, em MPa;

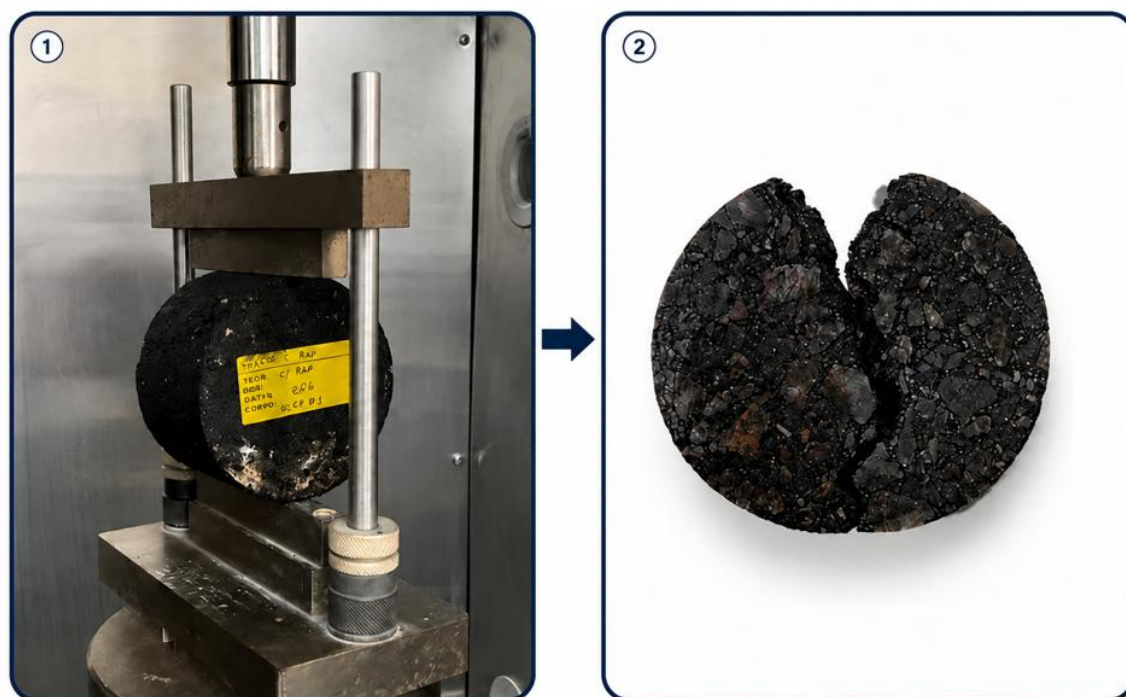
F – carga de ruptura, em N;

D – diâmetro de corpo de prova, em mm;

H – altura do corpo de prova (espessura), em mm.

Aplicou-se uma carga vertical progressiva à velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s até a ruptura completa ao longo do plano vertical. O valor de resistência à tração correspondeu à média aritmética de três corpos de prova. A Figura 3.15 mostra uma configuração comportamento do corpo de prova durante o ensaio.

Figura 3.15 - Esquema do ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral.



Fonte: (Próprio autor, 2026).

3.2.5 MÉTODO DE ANÁLISE

O tratamento dos dados obtidos nos ensaios mecânicos recorreu-se a abordagens estatísticas descritivas e inferenciais. De início, determinou-se as medidas descritivas (médias, desvio padrão e coeficiente de variação), de modo a analisar a dispersão de cada conjunto de dados. A análise inferencial, por sua vez, desenvolveu-se em etapas sucessivas, respeitando as premissas necessárias à aplicação de testes paramétricos.

A verificação da aderência dos dados à distribuição normal foi conduzida por meio do teste de Shapiro-Wilk, escolhido em razão de seu poder estatístico em amostras de tamanho reduzido. Lopes, Castelo Branco e Soares (2013), ao avaliarem ensaios de caracterização de agregados e misturas asfálticas, observaram que esse teste se mostra mais sensível e eficiente do que de Kolmogorov-Smirnov, principalmente quando o número de amostras é inferior a

trinta, sendo assim o mais indicado para validação da normalidade em estudos experimentais dessa natureza.

Confirmada a normalidade, avaliou-se a homogeneidade das variâncias entre os grupos por meio do teste de Levene, recomendado por ter robustez frente a desvios da normalidade e à presença de heterocedasticidade (Almeida et al., 2008). Atendidos os pressupostos de normalidade e homogeneidade, procedeu-se à análise de variância (ANOVA), técnica que possibilita identificar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre três ou mais grupos a partir da comparação da variabilidade entre grupos com a variabilidade dentro de cada grupo (Espitiro-Santo; Daniel, 2018). Vale destacar que, conforme alertam esses autores, a estatística F é sensível ao tamanho da amostra, razão pela qual se recomenda acompanhá-la de uma medida de tamanho do efeito que sintetize a magnitude da diferença observada.

Nos casos de rejeição da hipótese nula, aplicou-se o teste de comparações múltiplas de Tukey (Tukey HSD), adequado ao controle do erro do tipo I e à identificação dos pares de grupos responsáveis pelas diferenças detectadas pelo efeito global. Complementarmente, em conformidade com as recomendações de Espirito-Santo e Daniel (2018) e de Lakens (2013), reportaram-se medidas de tamanho do efeito, como o eta-quadrado (η^2) e o ômega-quadrado (ω^2), visto que esses indicadores, por não dependerem do tamanho da amostra, permitem dimensionar a relevância prática dos resultados e realizar comparações com outros estudos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos ao longo da pesquisa. São apresentados, inicialmente, os resultados da caracterização dos materiais, incluindo os agregados, o cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70) e o material fresado (RAP). Em seguida, são discutidos os resultados da análise mecânica dos corpos de prova moldados em laboratório com misturas asfálticas produzidas em usina, bem como as amostras de campo extraídas do pavimento após um ano de execução. Os resultados são discutidos com base na análise estatística, e comparados com a literatura e as normas relacionadas, permitindo avaliar o desempenho mecânico das misturas com diferentes teores de RAP no cenário laboratorial e de campo.

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 AGREGADOS E CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO

A caracterização física dos agregados é importante etapa na dosagem de misturas asfálticas. Porquanto, parâmetros como densidade e absorção influenciam na determinação dos volumes e no cálculo dos parâmetros volumétricos da mistura. A densidade relativa real (G_{sa}), a densidade relativa aparente (G_{sb}) e a absorção dos agregados miúdos foram determinadas conforme a norma DNIT ME 411 (2021), enquanto os agregados graúdos foram ensaiados de acordo com a norma DNIT ME 413 (2021). Os resultados obtidos para os agregados, sendo eles o pó de pedra (AP), areia (AA), e brita graduada simples (AB), estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Valores de densidade dos agregados

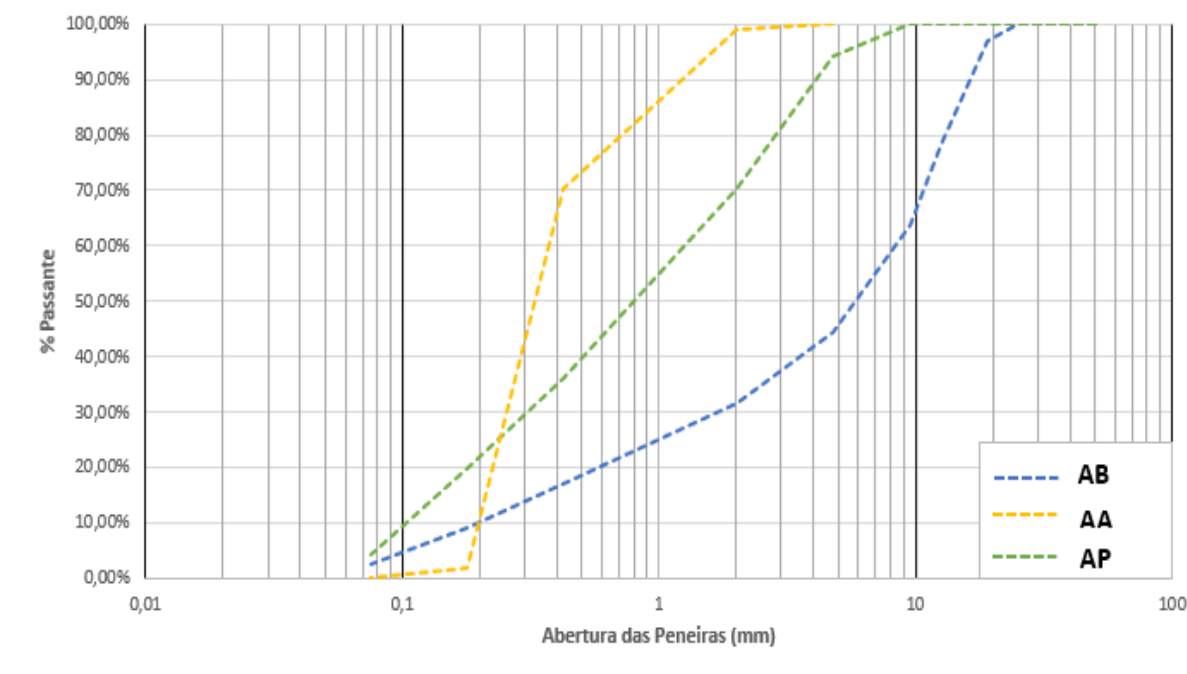
Agregados	Norma	Densidade Real (G_{sa})	Densidade Aparente (G_{sb})
Pó de pedra - AP	DNIT 411/2021-ME	2,770	2,696
Areia - AA	DNIT 411/2021-ME	2,646	2,587
BGS (Brita Graduada Simples) - AB	DNIT 413/2021-ME	2,857	2,740

Fonte: Próprio autor, 2026.

A análise granulométrica dos agregados graúdo (AB) e miúdos (AP e AA), procedeu-se por meio da norma DNIT 412 (2019), resultando nas curvas granulométricas, apresentadas na Figura 4.1, que representam a relação entre as aberturas das peneiras e a porcentagem de material retido ou passantes. Evidenciam distribuições granulométricas distintas e

complementares, o que favorece para o enquadramento na Faixa C da norma DNIT ES 031/2006.

Figura 4.1 - Curvas granulométricas dos agregados



Fonte: Próprio autor, 2026.

A caracterização química desses materiais foi realizada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria por Dispersão de Energia (EDS), com o objetivo de identificar a morfologia e composição mineralógica.

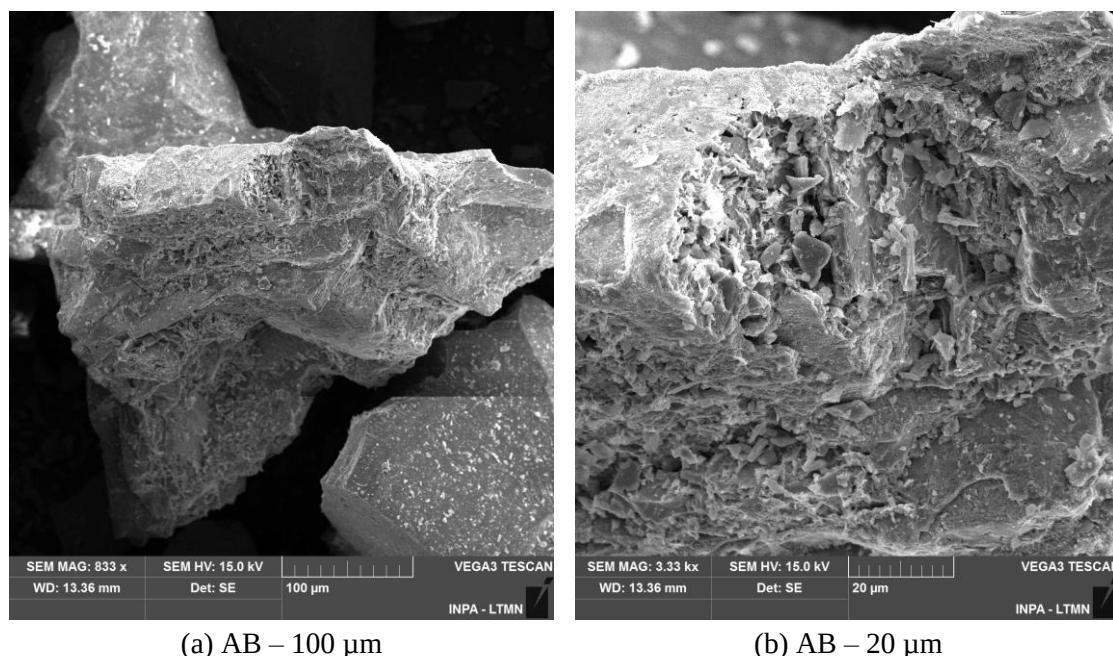
A MEV é uma técnica microestrutural que possibilita a obtenção de imagens topográficas de alta resolução a partir da interação de um feixe de elétrons focalizados com a superfície da amostra, produzindo sinais de elétrons secundários e retroespalhados que fornecem informações sobre morfologia, textura e rugosidade superficial (Mazumder et al., 2018; Trinh et al., 2023. Associada à EDS, a análise permite a identificação qualitativa e semiquantitativa dos elementos químicos presentes, por meio da detecção das emissões de raios X característicos gerados na região de interação entre o feixe eletrônico e o material (Hellmy; Azida, 2023; Barbosa et al., 2016).

Em materiais arenosos e litológicos de origem granítica, como os utilizados em misturas asfálticas, o conjunto MEV/EDS é empregado para revelar a composição mineralógica superficial dos agregados e identificar a presença de ligante asfáltico aderido, permitindo avaliar a cobertura e distribuição do betume sobre as partículas minerais (Mazumder et al.,

2018). Em agregados de origem granítica, a análise EDS identifica como compostos dominantes o dióxido de silício (SiO_2), o óxido de alumínio (Al_2O_3) e os óxidos de ferro e potássio, além de traços de outros elementos associados a feldspatos, micas e minerais de intemperismo, cuja distribuição superficial interfere diretamente nas propriedades de adesividade e na interação físico-química com o ligante betuminoso (Hellmy; Azida, 2023; Barbosa et al., 2016).

Para a amostra de BGS (AB), as micrografias MEV obtidas nas escalas de 100 μm e 20 μm (Figura 4.2), revelam morfologia predominantemente angulosa a subangulosa, com bordas vivas e superfícies de fratura orientadas segundo planos de clivagem e descontinuidade mineralógicas, característica de material produzido por britagem mecânica. A textura superficial é rugosa e heterogênea, com microrelevos e reentrâncias que conferem aspecto irregular à superfície, condição favorável ao ancoramento do ligante. Na escala de 20 μm , distinguem-se zonas de fratura, faces tabulares com clivagem definida consistente com feldspatos e partículas lamelares finas aderidas às superfícies maiores, com morfologia compatível com micas ou argilominerais.

Figura 4.2 - Micrografias MEV da BGS (AB) nas escalas de (a) 100 μm e (b) 20 μm .

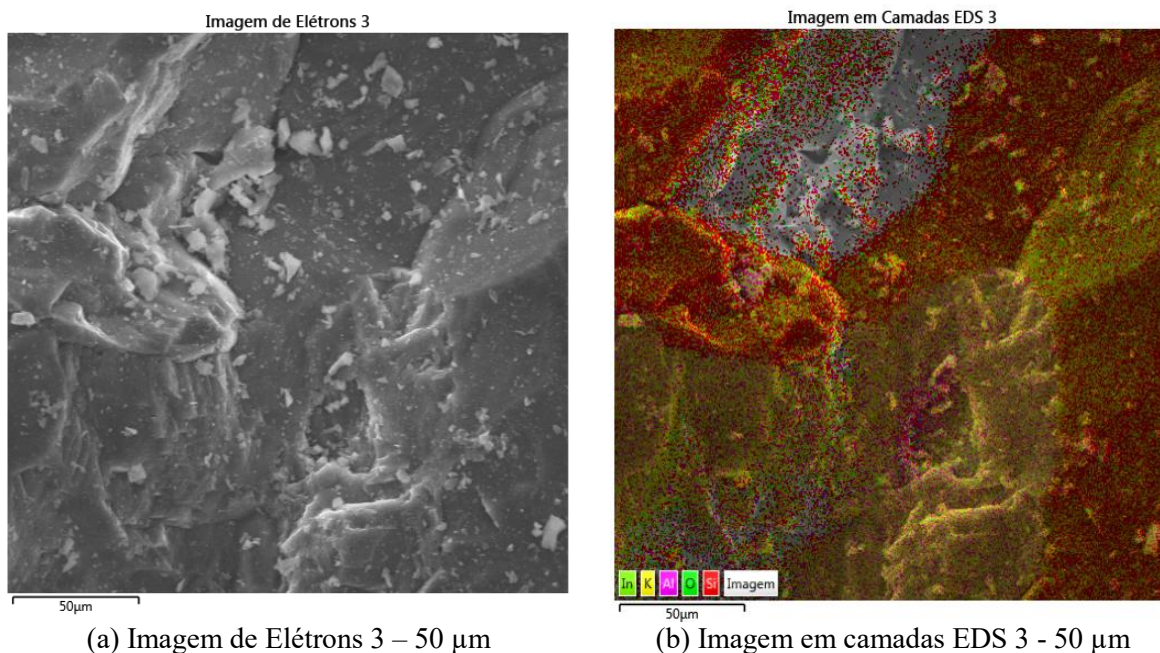


Fonte: Próprio autor, 2026.

A análise por Espectrometria por Dispersão de Energia (EDS) da BGS (AB) (Figuras 4.3 e 4.4 e Tabela 4.2) identificou composição silicatada, com predominância de oxigênio (54,32% em peso) e silício (36,53% em peso), elementos constituintes do quartzo e feldspatos, minerais principais de rochas graníticas. A presença de alumínio (3,71%) e potássio (4,15%) é

indicativa de feldspatos potássicos e micas, enquanto o sódio (0,41%) aponta para feldspato sódico em proporções menores. O ferro (0,27%) representa traços de óxidos superficiais de intemperismo.

Figura 4.3 - Imagens da amostra de BGS (AB).



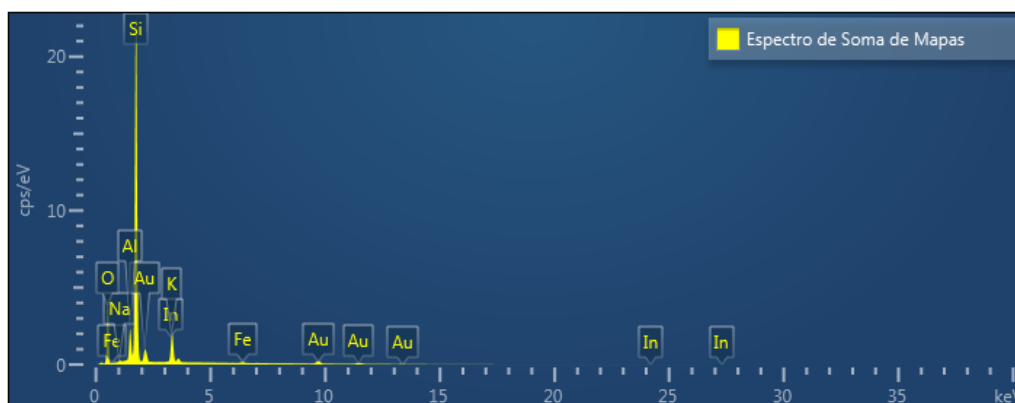
Fonte: Próprio autor, 2026.

Tabela 4.2 - Composição química elementar da BGS (AB) por EDS.

Elemento	Tipo de Linha	% em Peso	Sigma %Peso	% Atômica
O	Série K	54,32	0,15	68,35
Si	Série K	36,53	0,13	26,18
Al	Série K	3,71	0,03	2,77
K	Série K	4,15	0,03	2,13
Na	Série K	0,41	0,03	0,36
Fe	Série K	0,27	0,02	0,10
In	Série L	0,61	0,06	0,11
Total		100,00		100,00

Fonte: Próprio autor, 2026.

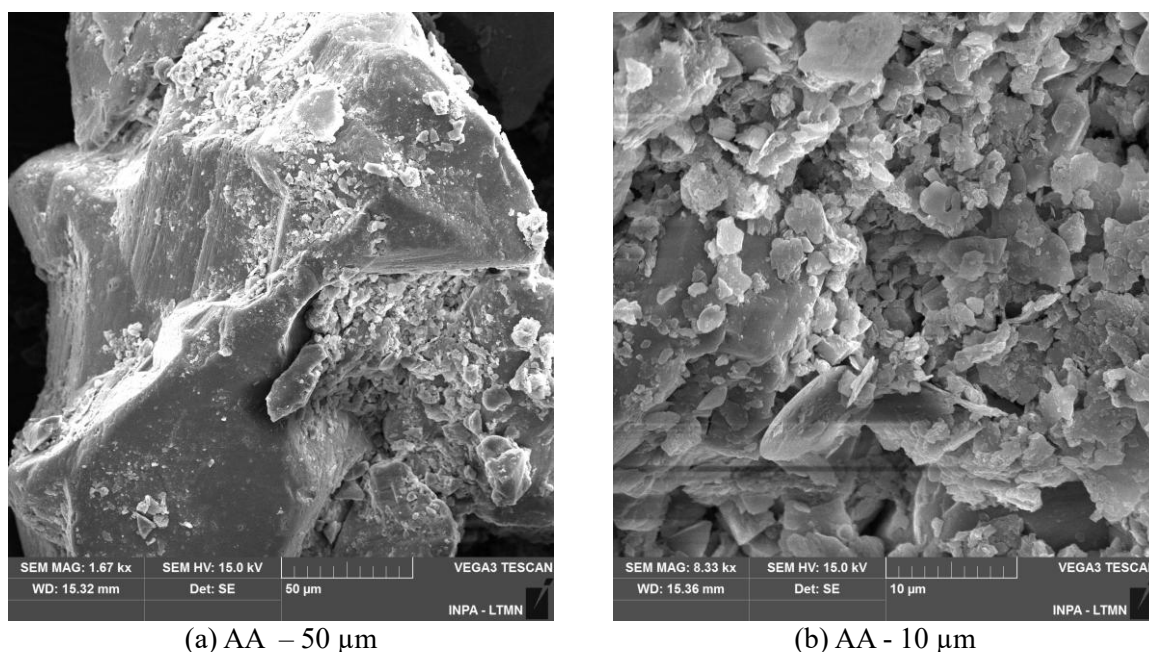
Figura 4.4 - Distribuição percentual em peso dos elementos da BGS (AB).



Fonte: Próprio autor, 2026.

As micrografias MEV da areia (AA), obtidas nas escalas de 50 μm e 10 μm (Figura 4.5), mostram grãos de granulometria fina a muito fina, com morfologia predominantemente subangulosa a subarredondada, com bordas parcialmente erodidas, indicando arredondamento associado ao transporte hídrico e ao intemperismo. Na escala de 10 μm , observam-se superfícies com textura mista: zonas lisas nos grãos maiores de quartzo e acúmulos de partículas muito finas aderidas à superfície com aspecto lamelar, compatível com a morfologia de argilominerais.

Figura 4.5 - Micrografias MEV da Areia (AA) nas escalas de (a) 50 μm e (b) 10 μm .



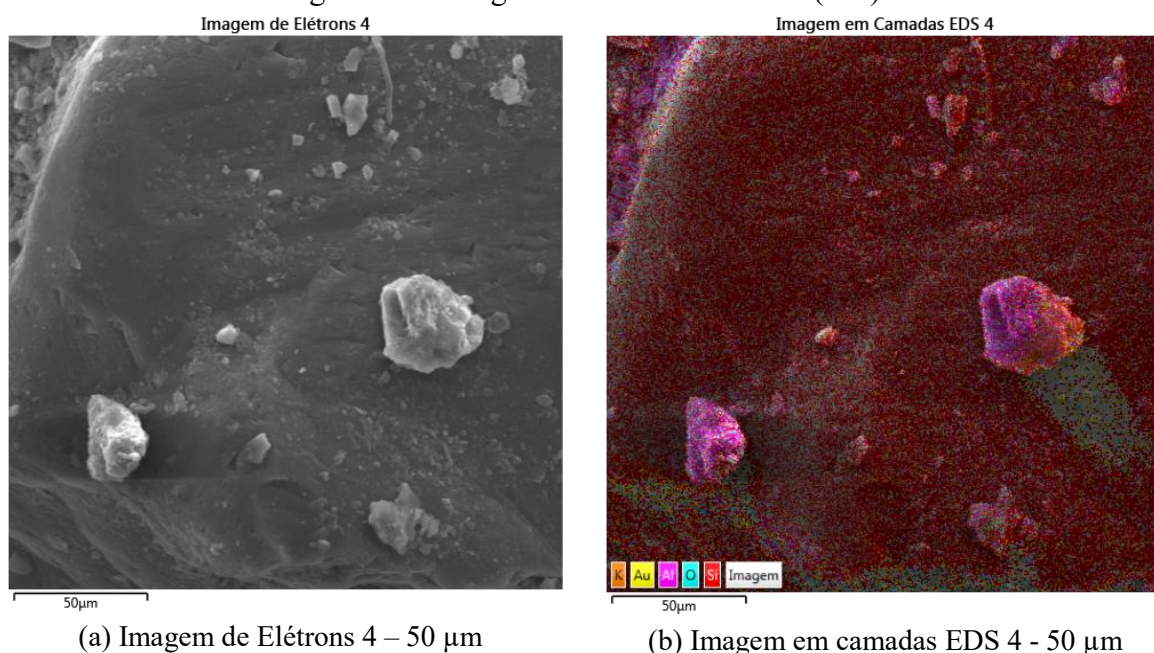
(a) AA – 50 μm

(b) AA - 10 μm

Fonte: Próprio autor, 2026.

A análise EDS da amostra de areia (AA) (Figuras 4.6 e 4.7, e Tabela 4.3) confirmou composição majoritariamente silicosa, oxigênio (50,93%) e silício (37,20%) como elementos dominantes, indicativo da presença de quartzo como mineral principal. O alumínio (0,86%) indica argilominerais em pequena quantidade, enquanto Ca, Fe e Ti aparecem em teores inferiores a 0,25%. Destaca-se o teor de carbono (10,53%), que se atribui à matéria orgânica adsorvida na superfície dos grãos.

Figura 4.6 - Imagens da amostra de areia (AA).



(a) Imagem de Elétrons 4 – 50 µm

(b) Imagem em camadas EDS 4 - 50 µm

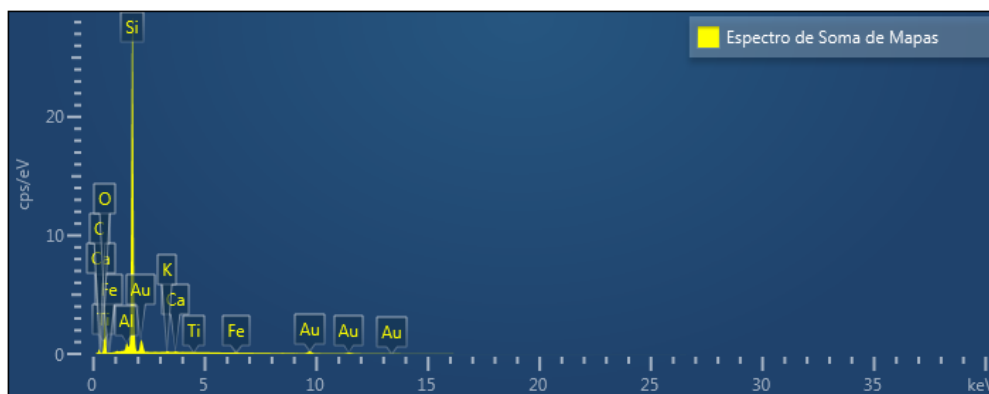
Fonte: Próprio autor, 2026.

Tabela 4.3 - Composição química elementar da Areia (AA) por EDS.

Elemento	Tipo de Linha	% em Peso	Sigma %Peso	% Atômica
O	Série K	50,93	0,48	58,66
Si	Série K	37,20	0,36	24,41
C	Série K	10,53	0,80	16,16
Al	Série K	0,86	0,02	0,59
K	Série K	0,13	0,01	0,06
Ca	Série K	0,10	0,01	0,04
Fe	Série K	0,21	0,02	0,07
Ti	Série K	0,04	0,01	0,01
Total		100,00		100,00

Fonte: Próprio autor, 2026.

Figura 4.7 - Distribuição percentual em peso dos elementos da Areia (AA).



Fonte: Próprio autor, 2026.

O cimento asfáltico do tipo CAP 50/70, comercializado pela refinaria de MANAUS (REAM), que disponibilizou o relatório de sua caracterização conforme as metodologias estabelecidas pela ASTM, atendeu o prescrito pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Os dados fornecidos pela refinaria estão expressos na Tabela 4.4. Todos os parâmetros avaliados atenderam às especificações normativas da ANP para o CAP 50/70.

Tabela 4.4 - Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP 50/70

Característica	Metodologia ASTM	Classificação ANP	Resultado	Unidade
Penetração	D5	50 – 70	65	0,1 mm
Ponto de amolecimento	D36	≥ 46	48	°C
Viscosidade Saybolt-Furol 135°C	E 102	> 141	315	s
Viscosidade Saybolt-Furol 150°C	E 102	> 50	225	s
Viscosidade Saybolt-Furol 177°C	E 102	30 – 150	87	s
RTFOT – Penetração retida	D5	> 55	68	%
RTFOT – Aumento do ponto de amolecimento	D36	< 8	4	°C
Ductilidade a 25°C	D113	> 20	> 100	cm
Variação em massa (RTFOT)	D2872	< 0,5	-0,06	% massa
Ponto de fulgor	D 92	> 235	331	°C
Solubilidade em tricloroetileno	D 2042	> 99,5	> 100	% massa
Ductilidade a 25°C (pós-RTFOT)	D113	> 60	> 100	cm

Fonte: Refinaria REAM.

4.1.2 RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP)

O material fresado (RAP) foi caracterizado com o objetivo de quantificar o teor residual de ligante asfáltico, determinar a distribuição granulométrica dos agregados extraídos e a verificar a composição mineralógica. A obtenção do CAP contido no RAP foi realizada conforme a norma DNER ME 053 (1994), pelo método de centrifugação com solvente. O resultado está apresentado na Tabela 4.5.

O teor de ligante residual encontrado de 4,47%, mostra-se coerente com a faixa típica de 4% a 6% reportada em estudos nacionais e internacionais para RAP proveniente de pavimentos com camadas de concreto asfáltico. Suzuki (2019), por exemplo, registrou teores de 5,39, 6,12 e 6,16% para diferentes amostras, enquanto Luzzi (2019) obteve valores entre 4,75 e 5,13%. Esse resultado é relevante pois, à medida que o teor de RAP na mistura aumenta, a contribuição do ligante envelhecido se torna mais expressiva, podendo influenciar tanto na viscosidade da mistura durante a usinagem quanto nas propriedades mecânicas da camada final.

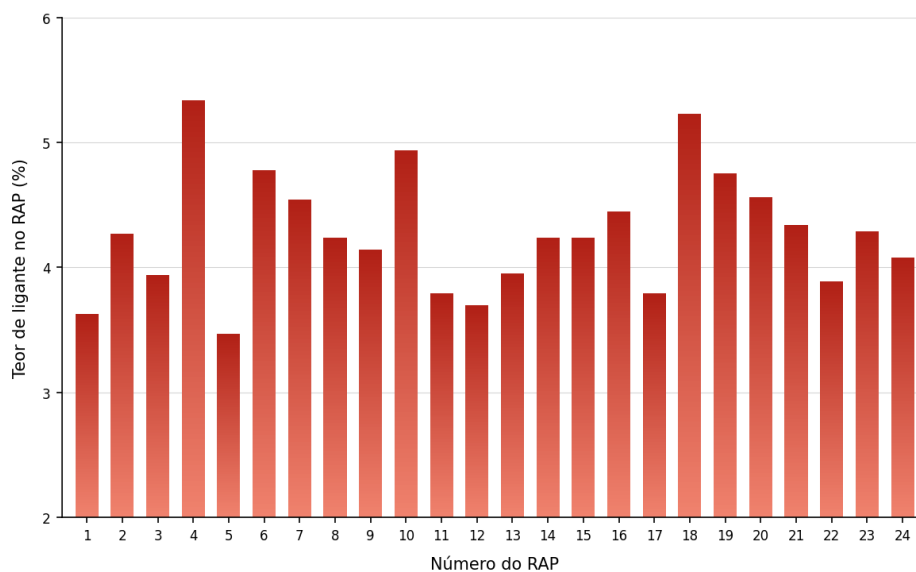
Ressalta-se, porém, que o teor de RAP é variável, visto que ao analisar um estoque desse material fresado utilizado na produção das composições asfálticas, foi identificado diferentes percentuais, como mostrado na Tabela 4.5. Gao *et al.* (2022), estudou a variabilidade de amostras de RAP em diferentes pontos do mesmo estoque, já que o material é oriundo de pavimentos distintos. Os autores obtiveram teores de ligante residual no RAP variando de 3,54% a 5,40%, conforme mostra a Figura 4.8.

Tabela 4.5 - Teor de ligante residual do estoque de RAP

Amostra	Teor de CAP residual
RAP 01	5,39%
RAP 02	4,56%
RAP 03	5,38%
RAP 04	6,47%
RAP 05	5,47%
RAP 06	6,10%
RAP 07	5,70%
RAP 08	6,50%

Fonte: Próprio autor, 2026.

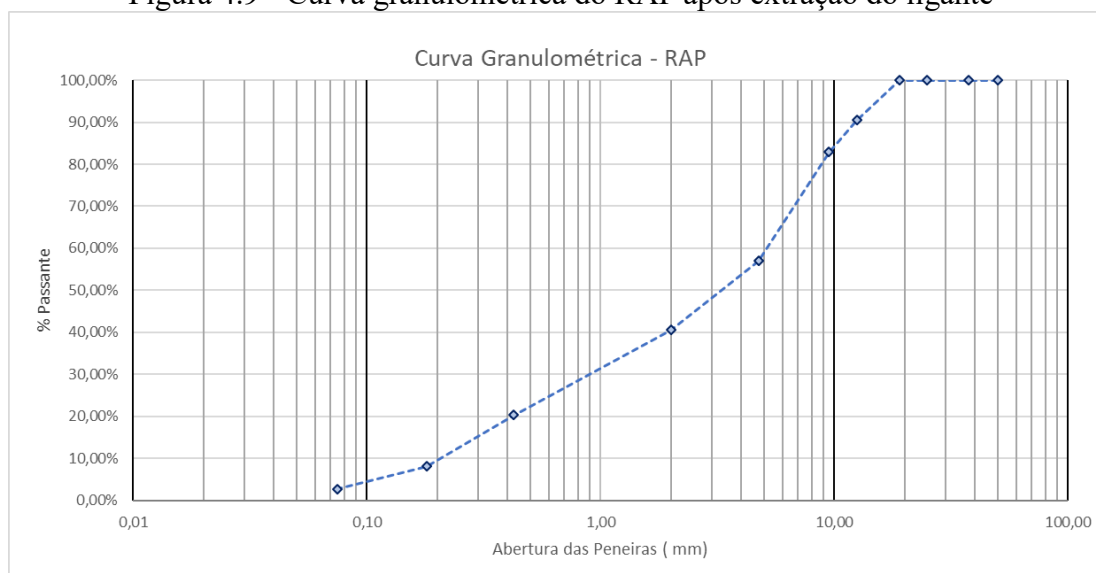
Figura 4.8 - Percentual de ligante asfáltico presente no RAP.



Fonte: Gao *et al.* (2022)

Após a extração, os agregados recuperados foram submetidos à análise granulométrica conforme a norma DNIT ME 412 (2019). A curva granulométrica obtida, apresentada na Figura 4.9, permitiu verificar a distribuição de tamanhos dos grãos do RAP e subsidiou a definição das proporções de mistura com os agregados virgens para o enquadramento na Faixa C.

Figura 4.9 - Curva granulométrica do RAP após extração do ligante



Fonte: Próprio autor, 2026.

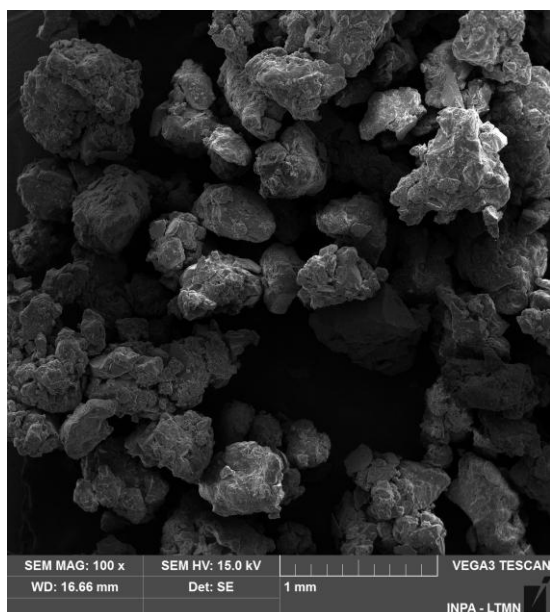
A caracterização química do RAP foi complementada por análises de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e MEV/EDS, com o objetivo de

identificar o grau de oxidação do ligante envelhecido e a composição mineralógica superficial dos agregados recuperados.

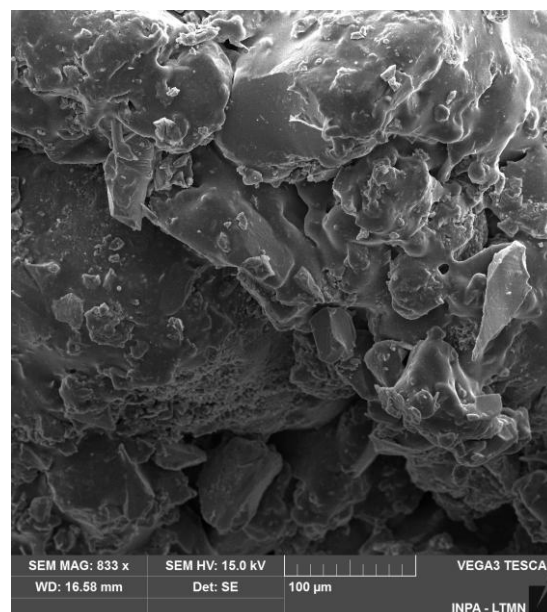
Para as micrografias MEV da amostra de RAP (AR), obtidas nas escalas de 1 mm, 100 μm e 50 μm (Figura 4.10), revelam morfologia heterogênea, caracterizada pela presença de partículas de agregado com formas angulosas a subangulosas, parcialmente envolvidas por um ligante asfáltico. Na escala de 1 mm, que ofereceu uma visão mais ampla do conjunto, observa-se a distribuição irregular das partículas, com grumos de diferentes tamanhos e graus de recobrimento pelo ligante, evidenciando a heterogeneidade granulométrica típica do material fresado.

Nas escalas mais aproximadas de 100 μm , verifica-se que a superfície do ligante que recobre os agregados apresenta textura rugosa e irregular, com descontinuidades, reentrâncias e fragmentos de partículas finas aderidos à matriz betuminosa. Observam-se ainda regiões com maior concentração de material fino sobre a superfície do ligante. Na escala de 50 μm , identificam-se regiões onde o recobrimento do ligante sobre os agregados é parcial ou irregular, com exposição de faces do agregado sem película betuminosa aparente. Observam-se igualmente descontinuidades pontuais na matriz do ligante, manifestadas como reentrâncias e irregularidades superficiais da película betuminosa.

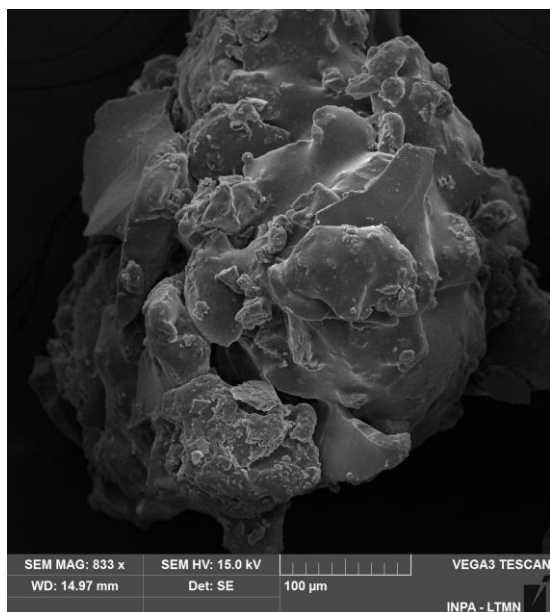
Figura 4.10 - Micrografias MEV do RAP (AR) nas escalas de (a) 1 mm, (b) 100 μm região 1 e (c) 100 μm região 2 e (d) 50 μm .



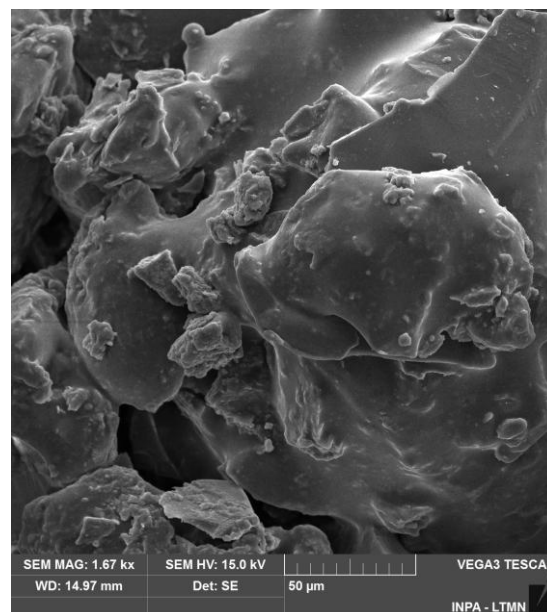
(a) AR – 1 mm



(b) AR – 100 μm (região 1)



(c) AR – 100 μm (região 2)



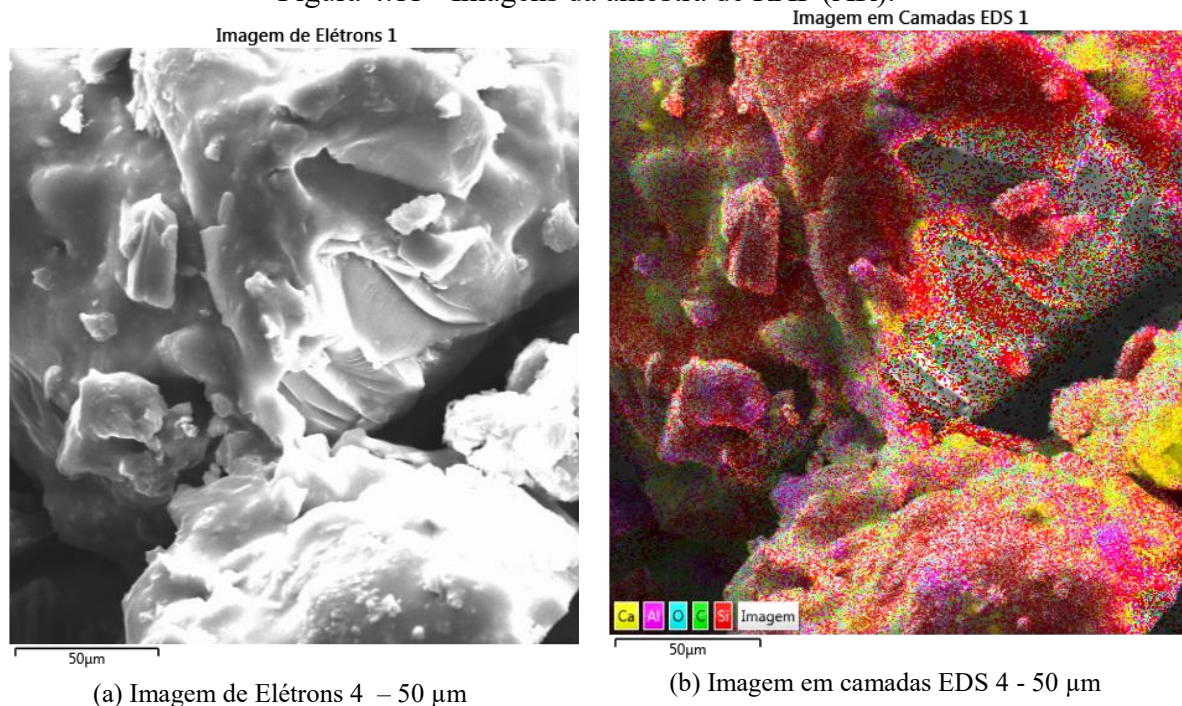
(d) AR – 50 μm

Fonte: Próprio autor, 2026.

A análise EDS do RAP (Figuras 4.11 e 4.12 e Tabela 4.6) identificou carbono como elemento dominante (54,71% em peso), característico do ligante asfáltico presente no material fresado, associado a elevado teor de oxigênio (32,39%), elemento componente tanto no ligante quanto nos minerais silicatos dos agregados. A presença do Si (9,79%), Al (1,69%) e Ca (0,96%) reflete a composição mineral dos agregados constituintes do RAP, com predomínio de minerais silicatados, quartzo e feldspatos; composição compatível com agregados de origem granítica ou gnáissica, como a BGS caracterizada no item 4.1.1. O enxofre ($S = 0,19\%$) é

atribuído à fração betuminosa do ligante asfáltico envelhecido presente no material fresado. A caracterização química do grau de envelhecimento oxidativo do CAP residual presente no RAP é discutida com base na análise FTIR, apresentada no item 4.1.3.

Figura 4.11 - Imagens da amostra de RAP (AR).



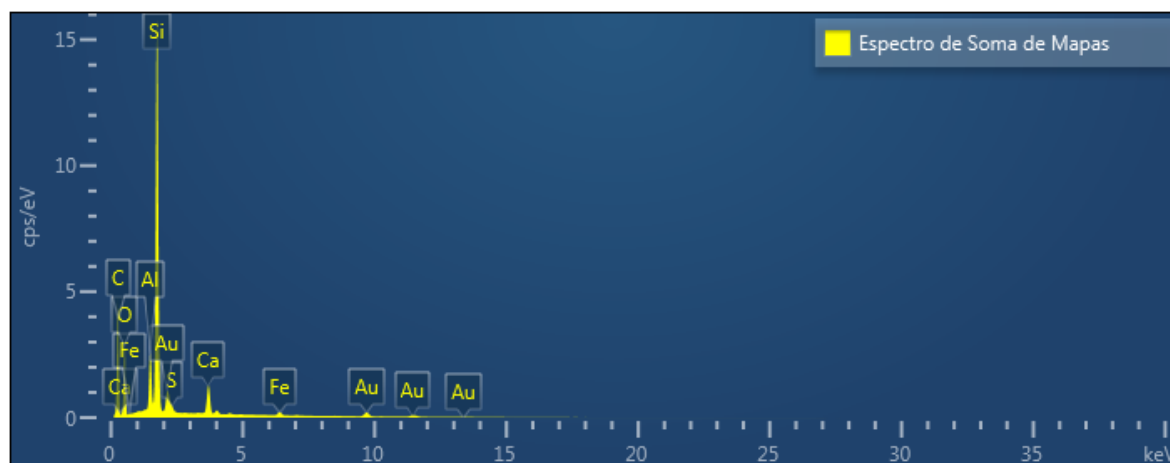
Fonte: Próprio autor, 2026.

Tabela 4.6 - Composição química elementar do RAP (AR) por EDS.

Elemento	Tipo de Linha	% em Peso	Sigma %Peso	% Atômica
C	Série K	54,71	0,21	64,83
O	Série K	32,39	0,19	28,82
Si	Série K	9,79	0,05	4,96
Al	Série K	1,69	0,01	0,89
Ca	Série K	0,96	0,01	0,34
Fe	Série K	0,25	0,01	0,06
S	Série K	0,19	0,01	0,09
Total		100,00		100,00

Fonte: Próprio autor, 2026.

Figura 4.12 - Distribuição percentual em peso dos elementos do RAP (AR).



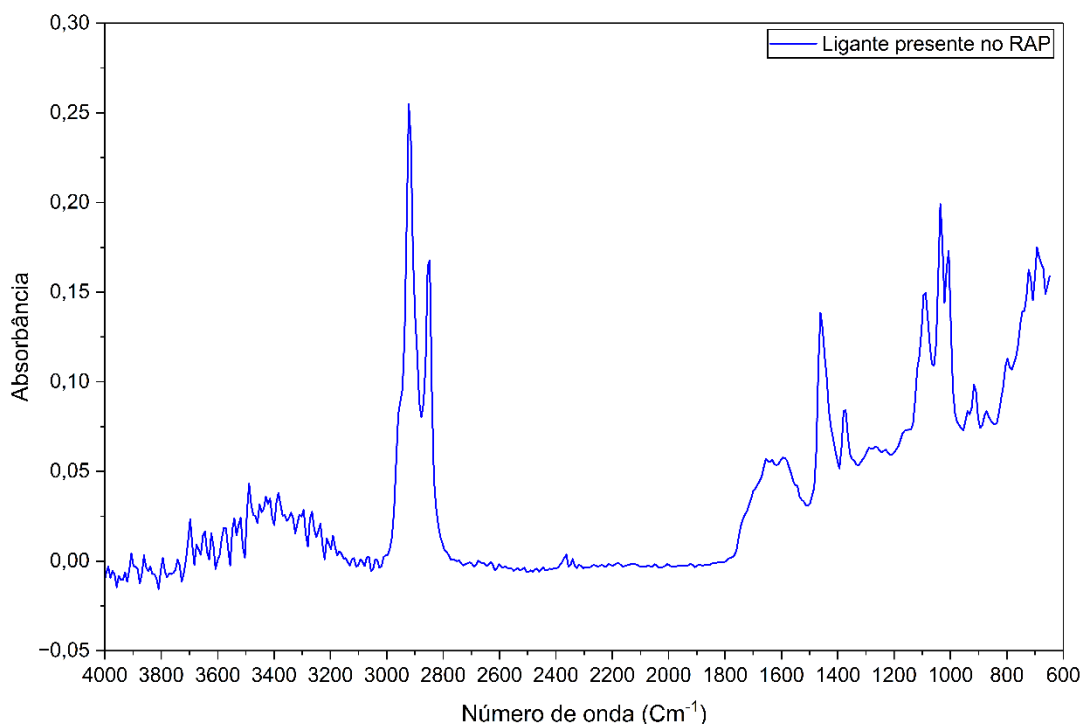
Fonte: Próprio autor, 2026.

A análise conjunta das micrografias MEV e do EDS evidencia partículas de agregado com morfologia angulosa a subangulosa, de dimensões variadas, parcialmente revestidas por matriz betuminosa contínua de aspecto irregular. A composição elementar predominantemente silicatada, com destaque para Si (9,79%), Al (1,69%) e Ca (0,96%), é compatível com minerais do grupo dos feldspatos e do quartzo, de origem granítica ou gnáissica, corroborando a natureza mineralógica dos agregados caracterizados no item 4.1.1. O recobrimento parcial e heterogêneo do ligante sobre os agregados, observado nas diferentes escalas de magnificação, é consistente com o caráter compósito do material fresado, constituído por agregados de distintas frações granulométricas envolvidos pelo ligante envelhecido, conforme evidenciado pela análise granulométrica após extração do ligante (item 4.1.2)

4.1.3 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) DO LIGANTE EXTRAÍDO DO RAP

A análise por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) foi realizada no ligante asfáltico extraído do RAP, com o objetivo de identificar os grupos funcionais presentes e avaliar o grau de envelhecimento oxidativo do betume residual. O ensaio foi conduzido em espectrômetro Agilent Technologies, com 8 varreduras, resolução de 16 cm^{-1} , faixa espectral de $650\text{ a }4000\text{ cm}^{-1}$ e apodização Happ-Genzel. O espectro obtido é apresentado na Figura 4.13.

Figura 4.13 - Espectro FTIR do ligante extraído do RAP.



Fonte: Próprio autor, 2026.

O pico de maior intensidade foi registrado em $2922,2\text{ cm}^{-1}$ ($I=0,255$), que corresponde ao estiramento assimétrico de grupos C-H de cadeias alifáticas ($-\text{CH}_2-$ e $-\text{CH}_3$), típico da estrutura molecular básica dos ligantes asfálticos. O pico em $2847,7\text{ cm}^{-1}$ ($I = 0,168$) refere-se ao estiramento simétrico de $-\text{CH}_2-$. Esses dois picos confirmam a preservação da estrutura alifática do ligante, independentemente do grau de envelhecimento (Oliveira, 2013). A banda em $1461,1\text{ cm}^{-1}$ ($I=0,139$) corresponde à deformação angular de C-H de grupos metileno, utilizada como referência estrutural estável no cálculo dos índices de envelhecimento (Oliveira, 2013; Chaves 2023). A banda em $1595,3\text{ cm}^{-1}$ ($I=0,058$) corresponde ao estiramento C=C de anéis aromáticos, característica das frações de asfaltenos e resinas, confirmada pelas bandas em $693,3\text{ cm}^{-1}$ ($I=0,175$) e $916,9\text{ cm}^{-1}$ ($I=0,098$), relativas a deformações fora do plano de C-H aromático.

O perfil espectral mostra envelhecimento oxidativo do ligante. A banda em $1036,2\text{ cm}^{-1}$ ($I=0,199$) corresponde ao estiramento S=O de grupos sulfóxido, principal marcador do índice de sulfóxido ($\text{IS}=\text{O}$). O índice calculado, $\text{IS}=\text{O}=\text{I}(1036)/\text{I}(2922)=0,199/0,255=0,78$, indica acúmulo de sulfóxidos em relação à estrutura alifática de referência, compatível com betume de RAP submetido a ciclos de envelhecimento em serviço. Na região de 3317 a 3697 cm^{-1} ,

bandas de baixa intensidade (I entre 0,016 e 0,043) são atribuídas à formação incipiente de grupos O-H, oriundos da oxidação do betume (Arruda, 2021).

Os resultados são consistentes com a literatura. Oliveira (2013) identificou as bandas de sulfóxidos (1030 cm^{-1}) e carbonila (1700 cm^{-1}) como indicadores de envelhecimento oxidativo do CAP 50/70, demonstrando que materiais mais envelhecidos apresentam maior absorbância nessas regiões. Chaves (2023) demonstrou correlação positiva entre IS=O e o módulo complexo G^* em ligantes com diferentes teores de RAP, indicando que o enrijecimento reológico está diretamente associado ao acúmulo de grupos sulfóxido, relação coerente com o aumento do módulo de resiliência observado nas misturas com maior teor de RAP nesta pesquisa. Arruda (2021) e Costa (2023) identificaram os mesmos grupos funcionais em ligantes recuperados de RAP de CAP 50/70, confirmando o padrão típico do espectro obtido.

4.2 Avaliação mecânica

A avaliação mecânica das misturas asfálticas produzidas com diferentes teores de RAP foi conduzida por meio dos ensaios de módulo de resiliência (MR) e resistência à tração por compressão diametral (RT), a partir de corpos de prova de misturas asfálticas produzidas em usina e moldados em laboratório, bem como amostras extraídas de um trecho experimental. Moldaram-se os corpos de prova laboratoriais no dia da construção do pavimento e aqueles extraídos do campo após um ano de submissão ao tráfego pesado. Analisaram-se estatisticamente os resultados por meio da verificação de normalidade (Shapiro-Wilk), homogeneidade de variâncias (Levene), ANOVA de fator único, Welch's ANOVA, Kruskal-Wallis e comparações múltiplas pelo método de Tukey HSD/Kramer, adotando nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

4.2.1 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

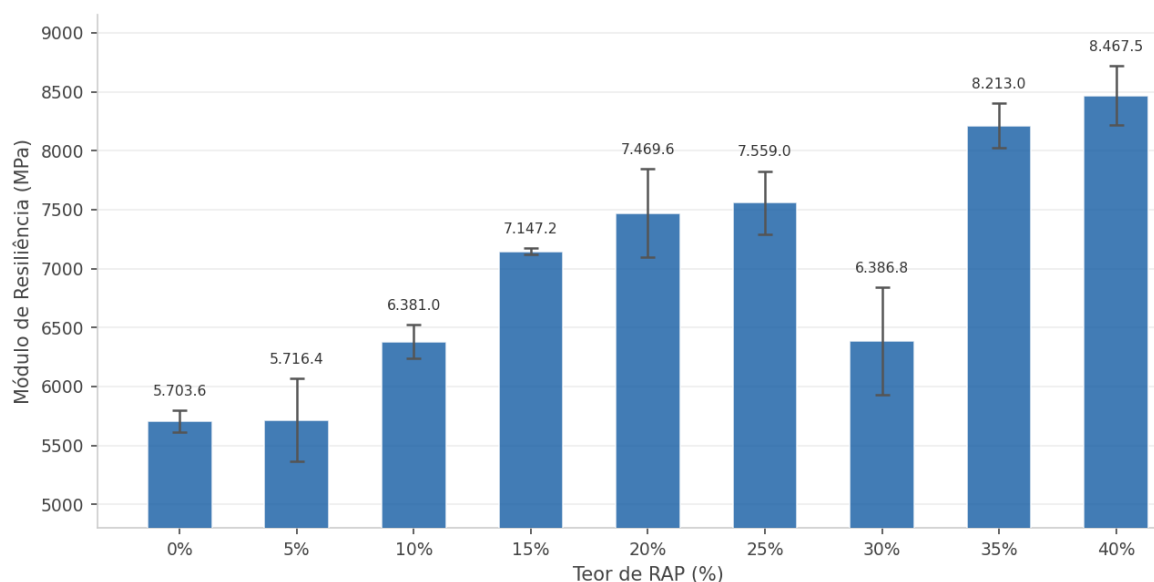
A) Corpos de prova de laboratório

Os resultados do MR dos corpos de prova de laboratório estão apresentados na Figura 4.14. Observa-se tendência de acréscimo do MR com o aumento do teor de RAP, decorrente do enrijecimento causado pelo ligante envelhecido presente no material fresado, conforme discutido no item 4.1.2. A mistura de referência (RAP 0%) registrou MR médio de 5.703,6 MPa (mediana de 5.684,0 MPa; DP=92,83MPa), enquanto as misturas com 35% e 40% de RAP atingiram 8.213,0 MPa (mediana de 8.211,5 MPa; DP=190,17MPa) e 8.467,5 MPa (mediana

de 8.459,5MPa; DP=250,60MPa), respectivamente, representando acréscimo de aproximadamente 48,5% em relação à referência. O teor de 15% demonstrou homogeneidade do conjunto, com DP = 28,19MPa e CV = 0,39%.

O teor de 30% não acompanhou o padrão crescente do MR, porquanto apresentou um valor médio de 6.386,8 MPa, similar ao resultado para 10% (6.381,0 MPa). Seus outros valores registraram mediana de 6.249,0MPa e o maior desvio-padrão e coeficiente de variação do conjunto (DP=454,98MPa; CV = 7,12%), indicando maior dispersão entre os corpos de prova desse teor. A Figura 4.14 apresenta visualmente esse comportamento, bem como a concentração dos valores nos teores mais altos (35% e 40%), com pequenos desvios-padrão.

Figura 4.14 - Módulo de resiliência médio x teor de RAP.
Barras de erro = ± 1 desvio-padrão



Fonte: Próprio autor, 2026.

Para verificar a normalidade aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk. Verificou-se o atendimento aos pressupostos estatísticos em todos os grupos (W entre 0,833 e 0,984; $p > 0,05$). Quanto à homogeneidade das variâncias, avaliaram-se os valores de p pelo teste Levene, no qual apontou que as variâncias se mostraram homogêneas ($F=1,466$; $p=0,209$). Após a confirmação da normalidade e da homogeneidade das variâncias, aplicou-se a ANOVA de fator único, que identificou diferença entre os grupos ($F = 58,97$; $p < 0,0001$; $\eta^2 = 0,937$), indicando que o teor de RAP explica a variabilidade dos valores de MR. Esse resultado mostrou-se de acordo com Welch's ANOVA ($F = 142,82$; $p < 0,0001$) e pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis ($H(8) = 37,43$; $p < 0,0001$), ambos convergindo para a mesma conclusão de diferença significativa entre os grupos.

O teste de Tukey HSD/Kramer (q crítico = 4,698) identificou 29 dos 36 pares com diferença significativa e permitiu agrupar os tratamentos em grupos homogêneos: o par 0%–5% forma um grupo de baixo MR, 10% - 30% apresentam desempenho análogo, os teores 15%, 20% e 25% constituem uma faixa intermediária sem diferença, e 35%–40% representam o grupo de maior rigidez, também sem diferença significativa. A Tabela 4.7 apresenta o conjunto dos resultados abordados.

Tabela 4.7 - Resumo da análise estatística – MR laboratório

Teste	Estatística	p-valor	Conclusão ($\alpha = 0,05$)
Shapiro-Wilk	$W \in [0,833; 0,984]$	$p > 0,05$ (todos)	Normalidade confirmada em todos os grupos
Levene	$F = 1,466$	$p = 0,209$	Variâncias homogêneas
ANOVA one-way	$F(8,32) = 58,97$	$p < 0,0001$	Diferença significativa entre grupos – rejeita H_0
Welch's ANOVA	$F(8; 12,32) = 142,82$	$p < 0,0001$	Confirmado (robusto para variâncias desiguais)
Kruskal-Wallis	$H(8) = 37,43$	$p < 0,0001$	Diferença significativa (não-paramétrico)
Tukey HSD/Kramer	q crit. = 4,698	29/36 pares	Grupos homogêneos: {0%,5%}; {10%,30%}; {15%,20%,25%}; {35%,40%}

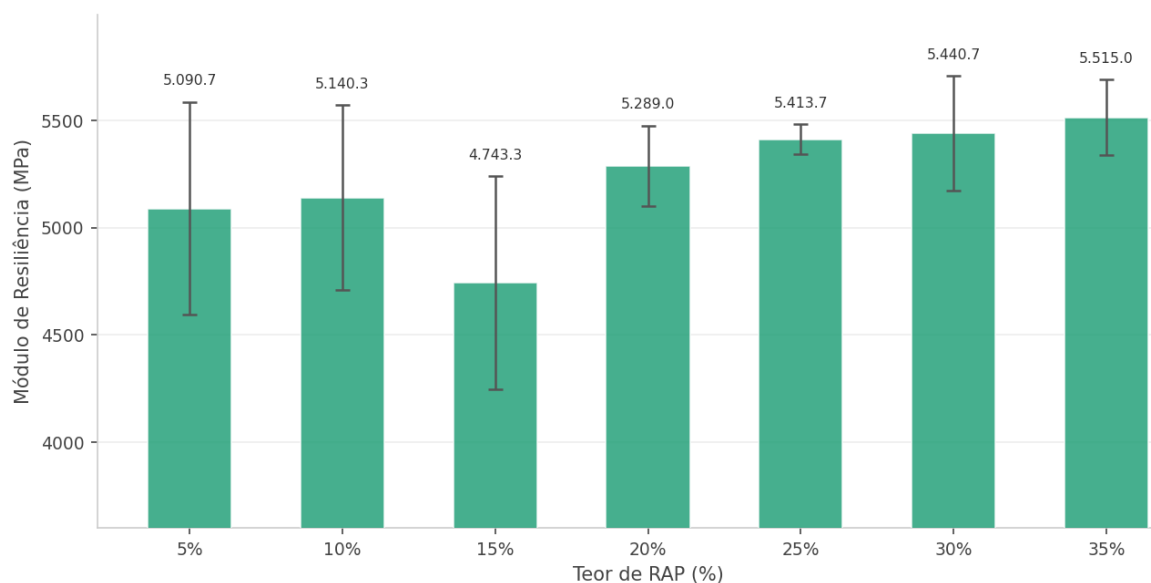
Fonte: Próprio autor, 2026.

B) Corpos de prova de campo

Os resultados do MR dos corpos de prova extraídos de campo são mostrados na Figura 4.15. Observa-se tendência de acréscimo do MR com o aumento do teor de RAP, com os maiores valores registrados nos teores de 30% (5.440,7 MPa; mediana = 5.460,0 MPa; DP = 268,52 MPa) e 35% (5.515,0 MPa; mediana = 5.531,0 MPa; DP= 176,54 MPa). O menor valor médio foi obtido no teor de 15% (4.743,3 MPa), enquanto o teor de 5% registrou MR médio de 5.090,7MPa.

Em relação à dispersão, o teor de 25% apresentou a maior homogeneidade do conjunto (DP=69,29MPa; CV 1,28%; mediana = 5.421,0), com média e mediana praticamente coincidentes, indicando distribuição simétrica. Em contraste, os teores de 15% (DP = 497,36 MPa; CV = 10,49%) e 5% (DP=496,46MPa; CV 9,75%) registraram os maiores desvios-padrão. Os demais teores (10%, 20%, 30% e 35%) apresentaram CVs entre 3,20% e 8,40% e medianas próximas às médias.

Figura 4.15 - Módulo de resiliência médio dos corpos de prova de campo x teor de RAP.
Barras de erro = ± 1 desvio-padrão.



Fonte: Próprio autor, 2026.

Após a aplicação dos testes de homogeneidade (Levene) e normalidade (Shapiro-Wilk), observou-se que as variâncias são homogêneas ($F=0,875$; $0,537$) e que os pressupostos de normalidade foram atendidos em todos os grupos (W entre $0,845$ e $0,998$; $p > 0,537$). Apesar disso, nenhum dos testes inferenciais empregados identificou diferença significativa entre os teores: A ANOVA de fator único ($F(6,14) = 1,815$; $p = 0,168$), a ANOVA de Walch ($F(6;5,80) = 1,055$; $p=0,477$), o teste de Kruskal-Wallis ($H(6) = 6,840$; $p=0,336$) e o teste de Tukey HSD/Kramer (q crítico = $4,829$), ou seja, não apontaram diferenças significativas em nenhum dos 21 pares avaliados. Esse resultado pode ter sido influenciado principalmente pelo número reduzido de corpos de prova por grupo ($n=3$), associado à maior variabilidade intrínseca das amostras extraídas de campo, o que representa uma limitação amostral importante a ser considerada na interpretação dos dados. Tem-se na Tabela 4.8 o resumo da análise estatística.

Tabela 4.8 - Resumo da análise estatística – MR campo

Teste	Estatística	p-valor	Conclusão ($\alpha = 0,05$)
Shapiro-Wilk	$W \in [0,845; 0,998]$	$p > 0,05$ (todos)	Normalidade confirmada em todos os grupos
Levene	$F = 0,875$	$p = 0,537$	Variâncias homogêneas
ANOVA one-way	$F(6,14) = 1,815$	$p = 0,168$	Sem diferença significativa entre grupos

Welch's ANOVA	$F(6; 5,80) = 1,055$	$p = 0,477$	Confirmado – sem diferença significativa
Kruskal-Wallis	$H(6) = 6,840$	$p = 0,336$	Sem diferença significativa (não-paramétrico)
Tukey HSD/Kramer	q crit. = 4,829	0/21 pares	Nenhum par significativo

Fonte: Próprio autor, 2026.

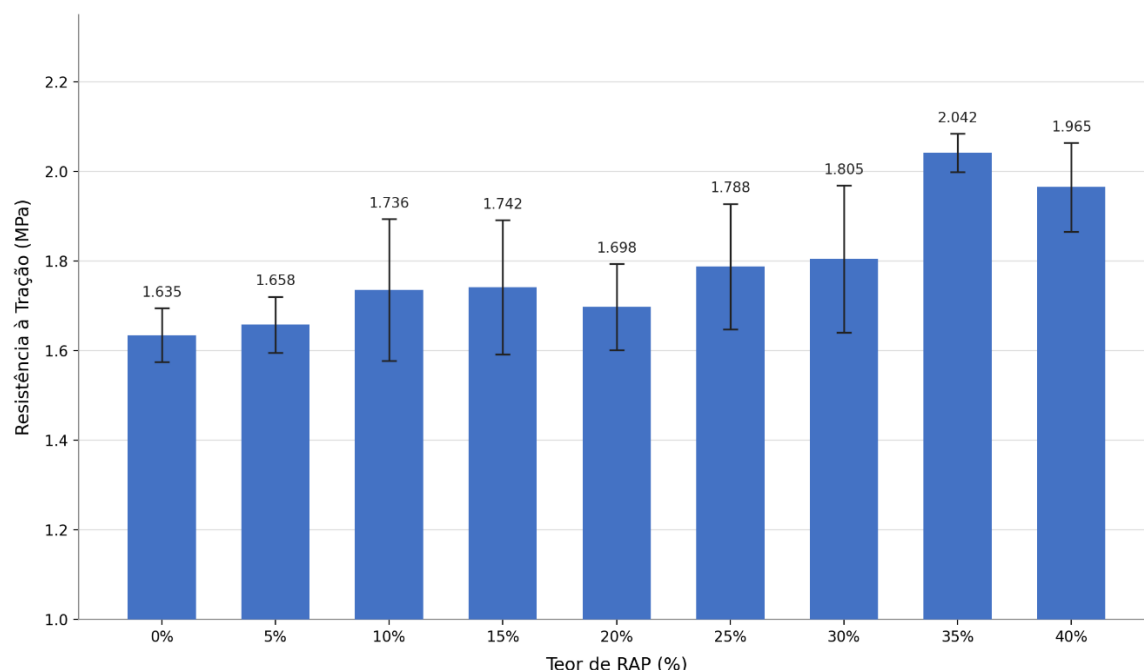
4.2.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A) Corpos de prova de laboratório

Os resultados da RT dos corpos de prova moldados em laboratório estão expressos na Figura 4.16. Observa-se tendência de aumento da RT com o incremento de RAP, com maiores valores nos teores de 35% (2,042 MPa; mediana = 2,041 MPa; DP = 0,043 MPa) e 30% (1,805 MPa; mediana = 1,819 MPa; DP=0,164 MPa). A mistura de referência (0% RAP) registrou RT média de 1,635 MPa (mediana = 1,663 MPa; DP = 0,060 MPa), representando o menor valor dos grupos. O teor de 35% destacou-se por ter maior homogeneidade, com menor desvio-padrão (DP=0,043 MPa) e CV de 2,11%, com média e mediana praticamente coincidentes (diferença de 0,0001 MPa), o que aponta para uma distribuição simétrica.

Já o teor de 30% difere do padrão, com maior valor de CV em comparação aos demais grupos (CV = 9,11%; DP = 0,164MPa) e diferença de 0,014MPa entre a média (1,805 MPa) e a mediana (1,819MPa). Semelhante a este, o teor de 10% apresentou CV de 9,09% (DP = 0,158MPa) e diferença entre média (1,736 MPa) e mediana (1,772 MPa) igual a 0,036 MPa. As demais proporções mostraram CVs entre 2,11% e 8,68% e medianas próximas às médias.

Figura 4.16 - Resistência à tração média dos corpos de prova de laboratório x teor RAP.
Barras de erro = ± 1 desvio-padrão



Fonte: Próprio autor, 2026.

Os critérios estatísticos foram atendidos, e a normalidade confirmada pelo Shapiro-Wilk nos nove grupos (W entre 0,770 e 1,000; $p > 0,05$) e variâncias homogêneas pelo Levene, com base nas medianas ($F = 0,369$; $p = 0,926$), indicando variância homogênea entre os grupos. Assim, foi utilizado a ANOVA de fator único, no qual indicou diferença significativa entre os grupos ($F(8,21) = 4,12$; $p = 0,004$; $\eta^2 = 0,611$), resultado confirmado pela Welch's ANOVA ($F = 11,57$; $p = 0,0001$) e pelo Kruskal-Wallis ($H(8) = 16,25$; $p = 0,0389$), consoante a Tabela 4.9.

O teste de Tukey HSD/Kramer (q crítico = 4,87) identificou 3 dos 36 pares com diferença significativa, são eles: 0% x 35% ($p=0,009$), 5% x 35% ($p=0,015$) e 20% x 35% ($p=0,023$). Os outros 33 pares não expressaram diferença relevante entre si, o que indica que embora exista uma tendência de aumento da RT conforme aumenta o teor de RAP, principalmente a partir de 35%, a maioria dos teores resulta em misturas com resistências estatisticamente equivalentes. A proporção de 35% apresentou valor superior em relação aos teores de 0%, 5% e 20%, o que pode indicar o incremento ótimo de material fresado. A Tabela 4.9 apresenta o conjunto dos resultados.

Tabela 4.9 - Resumo da análise estatística – RT laboratório

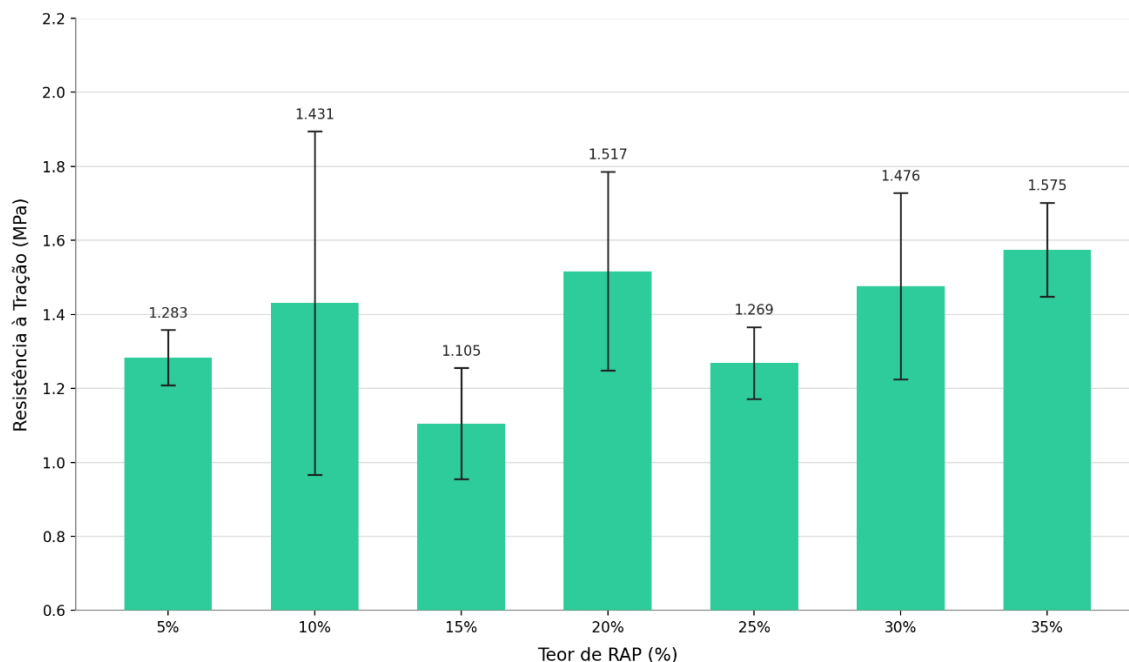
Teste	Estatística	p-valor	Conclusão ($\alpha = 0,05$)
Shapiro-Wilk	$W \in [0,770; 1,000]$	$p > 0,05$ (todos)	Normalidade confirmada em todos os grupos
Levene	$F = 0,369$	$p = 0,926$	Variâncias homogêneas
ANOVA one-way	$F(8,21) = 4,124$	$p = 0,004$	Diferença significativa entre grupos – rejeita H_0
Welch's ANOVA	$F(8; 8,47) = 11,567$	$p < 0,001$	Confirmado (robusto para variâncias desiguais)
Kruskal-Wallis	$H(8) = 16,252$	$p = 0,0389$	Diferença significativa (não-paramétrico)
Tukey HSD/Kramer	q crit. = 4,870	3/36 pares	3 pares significativos: 0%, 5% e 20% vs 35%

Fonte: Próprio autor, 2026.

B) Corpos de prova de campo

Os resultados da RT dos corpos de prova extraídos de campo estão descritos na Figura 4.17. Os maiores valores médios registraram-se nos teores de 35% (1,575 MPa; mediana = 1,630 MPa; DP=0,127MPa) e 20% (1,517 MPa; mediana = 1,570 MPa; DP = 0,269 MPa). O menor valor médio obteve-se no teor de 15% (1,105 MPa; mediana = 1,144 MPa; DP = 0,150 MPa). O teor de 25% demonstrou ter maior homogeneidade do conjunto, com DP de 0,096MPa e CV de 7,60%. Já o teor de 10% destoa do conjunto, com RT média de 1,431 MPa, mediana de 1,242 MPa e o maior desvio-padrão e coeficiente de variação (DP= 0,464 MPa; CV = 32,43%), indicando maior dispersão entre os corpos de prova do mesmo teor. Essa disparidade entre média e mediana, diferença de 0,189 MPa, é indicativo da influência de um corpo de prova com valor de RT mais alto (1,959MPa) relativo os demais do mesmo grupo.

Figura 4.17 - Resistência à tração média dos corpos de prova de campo x teor de RAP. Barras de erro = ± 1 desvio-padrão.



Fonte: Próprio autor, 2026.

Os pressupostos estatísticos foram parcialmente atendidos. Para os grupos que possuem três corpos de prova ($n \geq 3$), o teste de Shapiro-Wilk não rejeitou normalidade (W entre 0,858 e 0,983; $p > 0,05$). No caso dos grupos com 5% e 30%, ambos com apenas dois corpos de prova, não são compatíveis com o teste. A homogeneidade das variâncias verificou-se pelo teste de Levene, o resultado correspondeu a $F=0,619$ e $p=0,712$, que indica variâncias homogêneas entre os grupos.

Nenhum dos testes aplicados indicou diferença significativa entre os teores: a ANOVA de fator único ($F(6,12) = 1,295$; $p=0,330$), a Welch's ANOVA ($F(6;4,82) = 2,172$; $p = 0,211$) e o Kruskal-Wallis ($H(6)=7,668$; $p=0,263$), isto é, apontaram a mesma conclusão. O teste de Tukey HSD/Kramer (q -crítico = 4,950) não identificou diferença estatisticamente significativa em nenhum dos 21 pares avaliados. A Tabela 4.10 mostra o resumo desses resultados.

Tabela 4.10 - Resumo da análise estatística – RT campo

Teste	Estatística	p-valor	Conclusão ($\alpha = 0,05$)
Shapiro-Wilk	n = 2 a 3 por grupo	> 0,05 (grupos ≥ 3)	Normalidade não rejeitada (n limitado)
Levene	F = 0,619	p = 0,712	Variâncias homogêneas
ANOVA one-way	F(6,12) = 1,295	p = 0,330	Sem diferença significativa entre grupos
Welch's ANOVA	F(6; 4,82) = 2,172	p = 0,211	Confirmado – sem diferença significativa
Kruskal-Wallis	H(6) = 7,668	p = 0,263	Sem diferença significativa (não-paramétrico)
Tukey HSD/Kramer	q crit. = 4,950	0/21 pares	Nenhum par significativo

Fonte: Próprio autor, 2026.

A análise estatística dos testes é comprometida pelo reduzido número de corpos de prova por grupo (n = 2 a 3) e pela variabilidade intrínseca das amostras de corpos de prova extraídos de campo. O tamanho de efeito moderado obtido na ANOVA ($\eta^2 = 0,393$) indica que o teor de RAP influencia na RT, mas é insuficientemente detectado com o número de amostras disponíveis.

4.2.3 ANÁLISE LABORATÓRIO X CAMPO

Os resultados de MR e RT obtidos nos corpos de prova extraídos de campo (5% a 35% RAP) foram inferiores àqueles oriundos das amostras moldados em laboratório (0% a 40% RAP) para todos os teores comuns avaliados.

Específico ao MR, os valores médios de laboratório variaram entre 5.703,6 MPa (0% RAP) e 8.467,5 MPa (40% RAP), tendo os de campo registrado valores entre 4.743,3 MPa e 5.515,0 MPa, com menor e maior valor no teor de 15% e 35%, respectivamente. As reduções entre laboratório e campo nos teores comuns variaram de 10,9% (5% RAP) a 33,6% (15% RAP), com redução média de aproximadamente 24%. Consoante a RT, os valores laboratoriais situaram-se entre 1,635 MPa (0% RAP) e 2,042 MPa (35% RAP), aqueles procedentes do trecho experimental oscilaram entre 1,105 MPa (15% RAP) e 1,575 MPa (35% RAP), com reduções entre 10,7% (20% RAP) e 36,6% (15% RAP) e uma redução média de aproximadamente 22%.

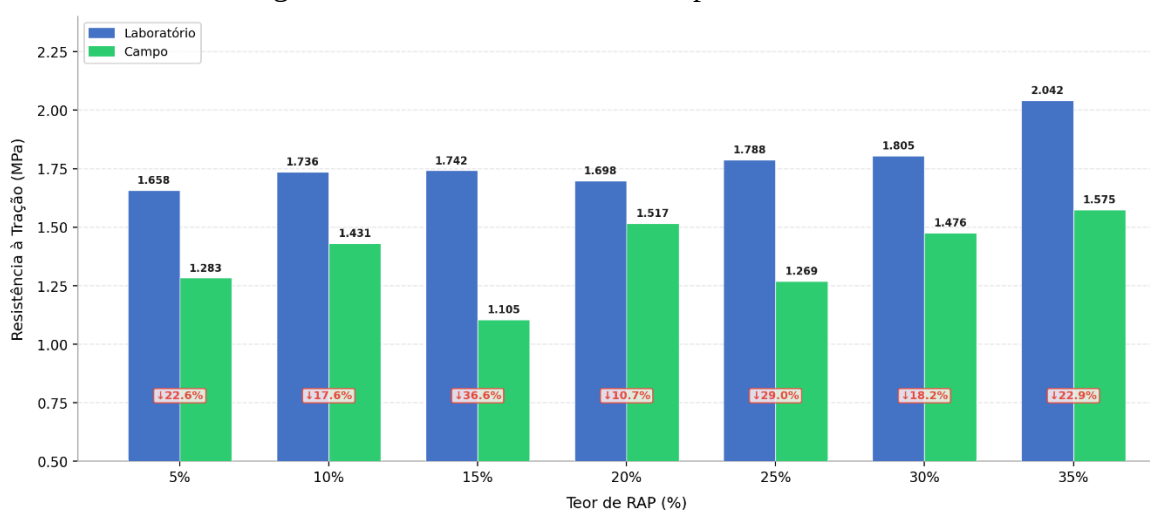
Em ambos os parâmetros, o teor de 15% apresentou a maior redução confrontando laboratório e campo (33,6% para MR e 36,6% para RT), enquanto para os teores de 5% e 20% registraram-se as menores reduções, o que indica que a magnitude da diferença entre os dois contextos não é uniforme ao longo dos teores. A Figura 4.18 e 4.19 mostram a comparação dos resultados de MR e RT para o conjunto de corpos de prova, obtidos em laboratório e extraídos da via urbana.

Figura 4.18 - MR laboratório e campo x % de RAP



Fonte: Próprio autor, 2026.

Figura 4.19 - RT laboratório e campo x % de RAP.



Fonte: Próprio autor, 2026.

Fonte: Próprio autor, 2026.

O coeficiente de variação também apresentou maiores valores nas amostras de campo relativo às de laboratório. Em particular, para o MR, os CVs de laboratório variaram entre

0,39% (15% RAP) e 7,12% (30% RAP), e os de campo ficaram entre 1,28% (25% RAP) e 10,49% (15% RAP). Para a RT, a diferença foi mais expressiva: os CVs de laboratório oscilaram entre 2,11% (35% RAP) e 9,11% (30% RAP), e os de campo atingiram entre 5,87% (5% RAP) e 32,43% (10% RAP). Essa maior dispersão refletiu a heterogeneidade intrínseca das amostras extraídas de pista.

Sob a perspectiva estatística, baseada na ANOVA de fator único, ANOVA de Walch, Kruskal-Wallis e Tukey HSD/Kramer, verificaram-se distinções importantes nos resultados de laboratório alusivos aos ensaios de MR e RT, diferentemente do que indicam os dados nas condições de campo, podendo advir da maior variabilidade das amostras, e não de uma equivalência mecânica real entre os teores avaliados, em conformidade com o indicado pelo tamanho de efeito moderado obtido na ANOVA dos dados de campo para a RT ($\eta^2 = 0,393$) e MR ($\eta^2 = 0,437$).

Apesar das diferenças absolutas, a tendência de crescimento dos valores com o aumento do teor do RAP manteve-se em ambos os contextos, especialmente nos teores mais elevados (30% e 35%). Adicionalmente, ressalta-se que todos os resultados da RT atenderam ao limite mínimo $\geq 0,65$ MPa estabelecido pela DNIT ES 031 (2006), confirmando a adequação mecânica das misturas independentemente do contexto de avaliação.

4.2.4 RAZÃO MR/RT

Pinheiro (2004) descreve que a relação MR/RT é considerada um indicador da vida de fadiga de misturas asfálticas, visto que associa a flexibilidade necessária aos revestimentos, por meio do MR, e de outro lado, a capacidade do revestimento em resistir aos esforços de tração, atribuída a uma alta resistência à tração.

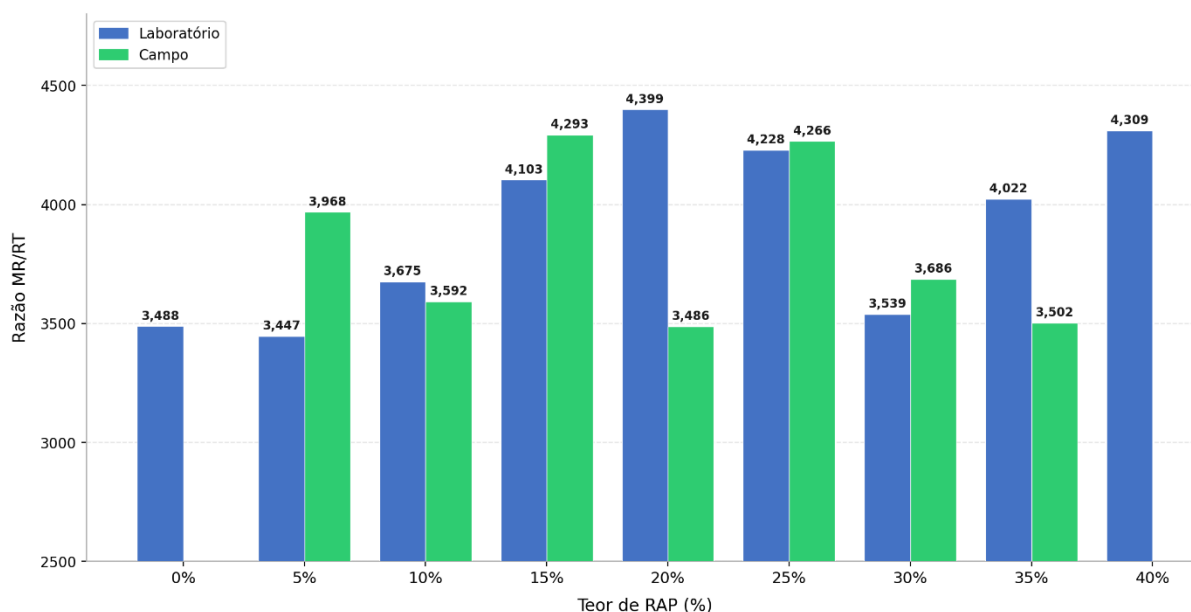
No trabalho de Santos et al. (2015), que estudaram misturas asfálticas com incorporação de argila montmorilonita no CAP, encontraram valor de MR/RT entre 1.833,86 a 4.847,66. Os autores destacaram que, quanto menor o valor de MR/RT, maior a tendência de melhoria no comportamento mecânico da composição. Dessa forma, valores baixos para esse índice, busca-se minimizar a rigidez a fim de evitar a elevada absorção de tensões que poderia levar ao trincamento prematuro, e ao mesmo tempo, uma alta resistência à tração, posto que a mistura conseguirá suportar melhor tais esforços. Na pesquisa de Santos e Lourenço (2018), os autores realizaram análise de misturas asfálticas com adição de escória como agregado miúdo e

encontraram resultado para MR/RT de 4.013. No caso da investigação de Santos e Fernando Junior (2020) obtiveram valores na faixa 3.589 a 4.488.

Carmo *et al.* (2021) analisaram misturas convencionais sem RAP, e encontraram razões MR/RT entre 2.734 e 2.968 para misturas dosadas pelo método Marshall e entre 3.479 e 3.760 para misturas Superpave. Os autores também pontuaram que, de acordo com a literatura por eles analisada, valores de MR/RT em torno de 3000 são indicativos de bom desempenho, pois conciliam flexibilidade com resistência à tração, e, portanto, maior vida de fadiga. Carvalho *et al.* (2021) analisou os parâmetros mecânicos de misturas asfálticas com adição de óxidos metálicos e obtiveram valores de MR/RT na faixa de 5000 a 6200. Os autores concluíram que as misturas modificadas apresentaram resultados inferiores aos da mistura convencional. Esse menor valor da razão MR/RT, portanto, aponta uma tendência benéfica ao comportamento mecânico das misturas asfálticas.

A Figura 4.20 mostra os resultados de MR/RT da presente pesquisa. Para os corpos de prova de laboratório as razões variaram de 3.447 (5%RAP) a 4.399 (20% RAP), com mediana 4.022, não demonstrando tendência de crescimento ou decréscimo em função do teor de RAP. Para as amostras de campo, os valores situaram-se entre 3.486 (20%RAP) e 4.293 (15%RAP), com mediana de 3.686, também sem apresentar tendência definida com o aumento de teor de fresado. A comparação entre as duas condições (laboratório e campo) não mostrou tendência uniforme, nos teores 5, 15, 25 e 30% de RAP, as amostras de campo obtiveram razões de MR/RT superiores às dos corpos de prova de laboratório, enquanto nos teores de 10, 20 e 35% ocorreu o inverso, com maior discrepância na proporção de 20%RAP, em que a diferença é de 4.399 (laboratório) e 3.486 (campo). As razões MR/RT da presente pesquisa ultrapassaram o valor sugerido por Carmo *et al.* (2021), mas, mostraram-se condizentes com as faixas de resultados obtidos por Santos *et al.* (2015) e Carvalho *et al.* (2021).

Figura 4.20 - Razão MR/RT x teor de RAP – laboratório e campo



Fonte: Próprio autor, 2026.

4.2.5 DISCUSSÃO COM A LITERATURA

A normatização brasileira, por meio da norma DNIT ES 031 (2006) e DNIT ES 031 (2024), estabelece o critério mínimo para a $RT \geq 0,65$ MPa de aceitação para misturas asfálticas densas e quentes. Na literatura nacional verificam-se nos estudos um aumento do valor da RT com o teor de incorporação de RAP. Na investigação de Bohn (2017), com misturas mornas participando com 25% e 50% de RAP, ele constatou que a inserção do material fresado promoveu ganhos, saindo da RT referência igual a 1,6 MPa para 3,0 MPa com 50% RAP. Luzzi (2019) trabalhou em uma usina volumétrica adaptada para processar teores de 10, 20 e 30% de RAP. Como resultado obteve um aumento da RT até o teor de 20% (2,70 MPa), mas decresceu para o teor igual a 30%. O autor atribuiu essa redução à menor eficácia na ativação do ligante residual em teores mais elevados, o que prejudica a homogeneidade da mistura. Oliveira (2020) estudou teores até 100% de RAP em composições asfálticas, tendo notado que o aumento do material fresado também acresce os valores da RT e associou ao ligante oxidado atuando como favorável à resistência.

No caso do módulo de resiliência, não existe normativa nacional que estabeleça um valor mínimo. Porém, na literatura tem-se trabalhos como Bernucci *et al.* (2022), com indicações de ordem de grandeza, para misturas asfálticas densas, na faixa 2.000 a 12.000 MPa. No estudo de Suzuki (2019), com teores de 0% a 65% de material fresado (sem agente rejuvenescedor) e teores de 25% e 50% (com agente vegetal), constatou-se que a rigidez

aumentou em conformidade com o acréscimo do teor de RAP, variando de 5.075 a 8.656 para as proporções de 10 a 65%, principalmente em composições acima de 35%. Centofante (2016) pesquisou o comportamento mecânico e adesividade em formulações recicladas à quente com 10, 20 e 30% de RAP e ligante virgem CAP 50/70. Obteve valores de MR entre 5.000 e 7.500 MPa, sendo o maior valor associado à 30% RAP, corroborando que o aumento da rigidez ocorreu com o acréscimo do material fresado. Correa (2020), analisou a influência de diferentes tipos de ligante (CAP 50/70 e AMP 60/85) em composições com 10, 20 e 30% de RAP. Verificou que, para as misturas com CAP 50/70, todas as três composições recicladas apresentaram MR inferior à referência. A autora atribuiu esse comportamento ao efeito do maior teor total de ligante das misturas recicladas, o qual se mostrou mais determinante para a rigidez do que o efeito do enrijecimento do ligante envelhecido presente no RAP. Arruda (2021) investigou o comportamento mecânico e autorregenerativo de misturas com 10, 30 e 50% de RAP. Seus resultados variaram de 7.326 a 11.287 MPa, mostraram um aumento de até 79% no MR para a proporção de 50%. É destacado que o uso de polímero modificando o ligante original presente no RAP influencia diretamente na rigidez.

Em complemento, ressalta-se os trabalhos brasileiros confrontando o desempenho de corpos de prova moldados em laboratório relativo aos obtidos em trechos experimentais. Oliveira (2013) avaliou misturas asfálticas recicladas mornas e quentes, com teores de 15, 35 e 50% de RAP, confeccionando corpos de prova em laboratório e executando um trecho experimental com o teor de 15%. Ao comparar os resultados de RT e MR entre os dois cenários, constatou que os valores obtidos de laboratório foram superiores aos de campo, com RT variando de 0,46 MPa a 0,71 MPa para as amostras extraídas e cerca de 0,90 MPa nas de laboratório. A autora atrelou essa disparidade ao menor controle de umidade e da granulometria dos agregados nas condições de campo em relação ao ambiente controlado de laboratório.

Reis (2013) comparou misturas produzidas em laboratório alusiva a composições usinadas em uma planta protótipo no campo. Os resultados para o MR de laboratório e de campo variaram entre 4.914 e 12.000 MPa, e na faixa 5.514 a 10.851 MPa, respectivamente. A variabilidade maior em campo foi atribuída a fatores operacionais do equipamento protótipo, como a precisão da pesagem dos agregados fresados. Chamouton (2024) monitorou trechos da Rodovia dos Bandeirantes com 25% e 35% de RAP durante cinco anos (2018 – 2023). Os resultados indicaram desempenho similar ao trecho controle para deflexão, irregularidade longitudinal e deformação permanente. Contudo, os trechos com RAP apresentaram maior susceptibilidade ao trincamento comparado ao trecho de referência. Além disso, Suzuki (2019)

e Menezes *et al.* (2019) destacam que a temperatura de compactação em pista é menos uniforme, o que resulta em maior volume de vazios e menor rigidez nas amostras extraídas.

No estado da arte internacional tem-se Galan *et al.* (2020) que avaliaram módulo de resiliência de misturas asfálticas a quente com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição, com resultados do MR na faixa 3.600 MPa a 12.900 MPa. Forton *et al.* (2024) observaram aumentos lineares na rigidez de composições asfálticas com 25% e 50% de RAP, sem incorporar agentes rejuvenescedores. Zalghout *et al.* (2022) notaram o efeito de endurecimento em misturas produzidas em usina, o que contribui para melhor resistência à deformação permanente. Quanto à resistência à tração, Abdel-Jaber *et al.* (2022) citam melhorias constantes na estabilidade e resistência Marshall conforme o aumento do teor de RAP (até 75%), atribuindo o ganho ao intertravamento dos agregados e à viscosidade do asfalto. Forton *et al.* (2024) demonstraram que o incremento do RAP, sem rejuvenescedor, promove o aumento da resistência à tração de 32% para 50% de RAP. No caso de Yang *et al.* (2021), os resultados indicaram que o aumento do teor de RAP, associados a uma graduação mais fina e maior temperatura, aumenta a compactação da mistura, facilitando o rearranjo dos agregados e a obtenção de densidades maiores. Esse comportamento foi atribuído ao baixo teor de vazios das misturas.

Pelo exposto e examinando a presente investigação os valores de RT de laboratório variaram entre 1,635MPa e 2,042MPa, representando um acréscimo de 152% a 214% em relação ao mínimo estabelecido pela norma DNIT $\geq 0,65$ MPa e condizente com os resultados de Bohn (2017) e Luzzi (2019). Os valores da via urbana oscilaram entre 1,105 MPa e 1,575 MPa, em torno de 70% acima desse limite prescrito. Deste modo, todos os teores avaliados, atenderam a essa normativa e também mostraram compatibilidade com os valores encontrados no estudo de campo de Oliveira (2013).

Específico ao módulo de resiliência, todas as composições estudadas se encontram dentro do intervalo citado por Bernucci *et al.* (2022), tanto as laboratoriais (5.703 a 8.467MPa) quanto extraídos da formulação de campo (4.743 a 5.515 MPa). Quanto aos resultados laboratoriais, os valores aproximaram-se daqueles encontrados por Suzuki (2019) e Reis (2013). Nas composições das misturas de campo estudadas por Reis (2013), os resultados também corroboram com a presente pesquisa.

Também deve-se enfatizar que a maior variabilidade estatística observada nos resultados de campo (CV de até 32,43% para RT), reflete os desafios de homogeneização discutidos por Gao *et al.* (2022). Ele observa que os estoques de RAP são frequentemente

heterogêneos em graduação e teor de ligante, o que dificulta o controle de qualidade na produção em usina. Adicionalmente, Martisius (2022) pontua que variáveis operacionais da usina, como a umidade do RAP, impactam diretamente o consumo de energia e a uniformidade da temperatura da mistura, o que pode justificar as diferenças encontradas entre os corpos de prova moldados em laboratório e os extraídos da pista após determinado período em serviço.

Em razão do exposto, verifica-se na literatura, seja nacional ou internacional, e na presente pesquisa que a incorporação de material fresado (RAP) em misturas asfálticas promove alteração no comportamento mecânico.

5. CONCLUSÃO

A presente pesquisa comparou, de forma inédita, o comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas em usina com diferentes teores de RAP, com as quais foram confeccionados corpos de prova em laboratório e executado um trecho experimental em campo. Após um ano de execução, coletaram-se amostras do pavimento e realizaram-se ensaios de Módulo de Resiliência (MR) e Resistência à Tração por compressão diametral (RT). Os resultados obtidos permitiram confirmar a hipótese inicial, baseada na literatura, e, portanto, alcançar os objetivos propostos, conforme exposto a seguir.

A caracterização do material fresado confirmou tratar-se de agregados recobertos por ligante asfáltico envelhecido. As análises de MEV e FTIR evidenciaram, respectivamente, a morfologia heterogênea da superfície do ligante, com recobrimento irregular e descontinuidades na película betuminosa e o acúmulo de grupos sulfóxido, principal marcador de envelhecimento oxidativo, caracterizando um betume convencional envelhecido em serviço. Esse envelhecimento do ligante constitui o fator determinante do comportamento mecânico das misturas com RAP e discutido a seguir.

Quanto à avaliação mecânica, observou-se tendência de aumento do módulo de resiliência com o incremento do teor de RAP, decorrente do enrijecimento provocado pelo ligante envelhecido. Nos corpos de prova de laboratório, o MR médio variou de 5.703,6 MPa (0% RAP) a 8.467,5 MPa (40% RAP), enquanto nas amostras de campo os valores situaram-se entre 4.743,3 MPa (15% RAP) e 5.515,0 MPa (35% RAP). A análise estatística (ANOVA de fator único, ANOVA de Welch, Kruskal-Wallis e teste de Tukey HSD/Kramer) confirmou diferenças significativas entre os teores nas condições de laboratório, permitindo o agrupamento dos tratamentos em faixas homogêneas de rigidez, com os teores de 35% e 40% constituindo o grupo de maior módulo.

A resistência à tração apresentou comportamento análogo, com tendência de crescimento em função do teor de RAP. Em laboratório, os maiores valores foram registrados nos teores de 35% (2,042 MPa) e 40% (1,965 MPa), em comparação ao valor de 1,635 MPa da mistura de referência. Em campo, os maiores valores ocorreram nos teores de 35% (1,575 MPa) e 20% (1,517 MPa). Destaca-se que todos os resultados de RT, em ambos os contextos, atenderam ao limite mínimo de 0,65 MPa estabelecido pela DNIT ES 031 (2006), confirmando a adequação mecânica das misturas independentemente do teor de RAP avaliado.

A comparação entre laboratório e campo revelou que os valores de MR e RT das amostras extraídas do trecho experimental foram sistematicamente inferiores aos dos corpos de prova moldados em laboratório, com reduções médias de aproximadamente 24% para o MR, variando de 10,9% (5% RAP) a 33,6% (15% RAP). As amostras de campo também apresentaram maiores coeficientes de variação, refletindo a variabilidade inerente aos processos de produção em usina, transporte, compactação e extração de campo. Apesar dessas diferenças absolutas, a tendência de crescimento das propriedades mecânicas com o aumento do teor de RAP manteve-se em ambos os contextos, especialmente nos teores mais elevados.

Conclui-se, portanto, que a incorporação de RAP em misturas asfálticas a quente é técnica e ambientalmente viável, promovendo o enrijecimento progressivo do concreto betuminoso sem prejuízo ao atendimento dos requisitos mecânicos normativos. A confirmação dessa tendência tanto em laboratório quanto em campo reforça a importância dos resultados e contribui para a redução da lacuna existente entre o desempenho idealizado e o desempenho real das misturas recicladas.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a avaliação da vida de fadiga e da deformação permanente por meio de ensaios específicos, a investigação da influência do procedimento de extração e recuperação do ligante sobre o grau de envelhecimento medido, e o monitoramento de longo prazo do trecho experimental, de modo a consolidar critérios de dosagem que ampliem com segurança o emprego de altos teores de RAP na pavimentação.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-JABER, M. et al. Mechanical properties evaluation of asphalt mixtures with variable contents of reclaimed asphalt pavement (RAP). *Results in Engineering*, v. 14, 100463, 2022.
- ALMEIDA, A.; ELIAN, S.; NOBRE, J. Modificações e alternativas aos testes de Levene e Brown e Forsythe para igualdade de variâncias e médias. *Revista Colombiana de Estadística*, v. 31, p. 241-260, 2008.
- AMMANN. ACM Prime 2.0: usinas de asfalto contínuas. Disponível em: <https://www.ammann.com/pt-BR/plants/asphalt-plants/continuous-asphalt-mixing/acm-prime/>. Acesso em: 20 fev. 2026.
- ARRUDA, S. M. Avaliação das propriedades mecânicas e capacidade de autorregeneração de misturas asfálticas com material fresado (RAP) antes e após envelhecimento. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17100-1:2023 – Gerenciamento de resíduos – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- BAI, Z. et al. Study on the development and performance optimization of gussasphalt containing high percent of fine reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, v. 420, p. 135557, 2024.
- BARBOSA, P. T. F.; ZAMPIERON, S. L. M.; ZAMPIERON, J. V. Avaliação de materiais filtrantes através de técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria por Dispersão de Energia (EDS). In: XIII CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE DE POÇOS DE CALDAS, 13., 2016, Poços de Caldas. Anais [...]. Poços de Caldas, 2016.
- BARROSO, Reinaldo de Sousa. Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de RAP e uso de asfalto borracha. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2025.
- BERNUCCI, L. B. et al. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. 4. ed. Rio de Janeiro: Petrobras/ABEDA, 2022.
- BOCCI, E.; PROSPERI, E.; BOCCI, M. Influence of the Hot-Mix Asphalt Production Temperature on the Effectiveness of the Reclaimed Asphalt Rejuvenation Process. *Infrastructures*, v. 8, n. 8, 2023.
- BOHN, K. A. Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

CARMO, C. A. T. do; MARQUES, G. L. de O.; PEREIRA, G. S.; BORGES, P. R. Análise mecânica-empírica de um pavimento flexível em função do fenômeno de fadiga de misturas asfálticas. *Revista Pavimentação*, v. 15, n. 50, p. 5-30, mar. 2021. DOI: 10.29327/235171.1.50-1.

CARVALHO, F. S. de S.; LUCENA, A. E. de F. L.; NETO, O. M. de M.; PORTO, T. R.; PORTO, T. M. R. Análise dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas com adição de óxidos metálicos. *Revista Matéria*, v. 26, n. 3, e13020, 2021. DOI: 10.1590/S1517-707620210003.13020.

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

CHAMOUTON, Marcos Salles. Avaliação do desempenho em campo e em laboratório de misturas asfálticas com diferentes teores de RAP e agente de reciclagem. 84 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

CHAVES, Andressa Cristina Borges. Análise da interação entre ligantes de mistura asfáltica com RAP, com e sem uso de agentes rejuvenescedores. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

CHEN, Yuheng; CHEN, Zhiguo; XIANG, Qian; QIN, Weijun; YI, Junyan. Research on the influence of RAP and aged asphalt on the performance of plant-mixed hot recycled asphalt mixture and blended asphalt. *Case Studies in Construction Materials*, v. 15, out. 2021.

CORREA, Bethania Machado. Análise de rigidez e danificação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes tipos e teores de RAP. 149 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

COSTA, L. F. Dosagem e avaliação de misturas asfálticas mornas recicladas com elevado teor de RAP e bioligante. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER ME 053/1994: Misturas betuminosas – percentagem de betume – Método de ensaio (extração por centrifugação). Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER ME 043/1995: Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de Pavimentação. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031/2006 – ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 033/2021 – ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado em usina a quente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031/2024 – ES: Pavimentação – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 095/2006 – EM: Cimento asfálticos de petróleo – Especificação de material. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 178/2018 – PRO: Pavimentação asfáltica – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento. Rio de Janeiro: DNIT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 411/2021 – ME: Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 412/2019 – ME: Pavimentação – Misturas Asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 413/2021 – ME: Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2021.

ESPIRITO-SANTO, Helena; DANIEL, Fernanda. Calculating and reporting effect sizes on scientific papers (3): Guide to report regression models and ANOVA effect sizes. Portuguese Journal of Behavioral and Social Research, v. 4, n. 1, p. 43-60, 2018.

FORTON, A. et al. Evaluation of Bio-Rejuvenator and Compaction Conditions on Stiffness Modulus and Indirect Tensile Strength of Recycled Hot Mix Asphalt. *Materials*, v. 17, n. 13, 3081, 2024.

FRANCO, F. A. C. P. Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

GALAN, J. J. et al. Evaluation of the resilient modulus of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates from construction and demolition waste. *Sustainability*, v. 12, n. 20, p. 8551, 2020.

GAO, J. et al. Determining the maximum permissible content of reclaimed asphalt pavement stockpile in plant hot-mix recycled asphalt mixtures considering homogeneity: a case study in China. *Case Studies in Construction Materials*, v. 16, art. e00961, 2022. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e00961.

GASPAR, Matheus de Souza. Mecanismo de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna. 129 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

GIANI, Martina Irene; DOTELLI, Giovana; NICOLÓ, Brandini; ZAMPORI, Luca. Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 104, p. 224-238, nov. 2015.

GONTIJO, M. D. Análise granulométrica por imagem de amostras ultrafinas. *Revista Eletrônica Engenharia de Interesse Social*, v. 1, n. 3, p. 1-13, 2018.

HELLMY, M.; AZIDA, N. Selective visualization techniques for elemental mapping analysis of granite stones by field emission scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy (FESEM-EDXS). *Materials Today: Proceedings*, v. 75, p. 173-180, 2023.

INSTITUTO DE ASFALTO. Manual de Asfalto. Série do Manual n. 4 (MS-4). 1989.

KADHIM, Mustafa A.; BUSALTAN, Shakir A.; DULAIMI, Anmar; SADIQUE, Monower; NAGEIM, Hassan A.; KAFAJI, Muna A.; YASARI, Rand A. Developing a sustainable, post treated, half warm mix asphalt for structural surface layer. *Construction and Building Materials*, 2022.

LAKENS, D. Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: a practical primer for t-tests and ANOVAs. *Frontiers in Psychology*, v. 4, p. 863, 2013.

LINHARES, Miguel Faé. Estudo da influência das propriedades dos agregados sobre o comportamento à fadiga e autorregeneração de matrizes de agregados finos. 130 f. Dissertação

(Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022.

LOPES, Albaniza Maria da Silva. Avaliação dos efeitos da temperatura, radiação UV e umidade nas propriedades de ligantes e misturas asfálticas. 223 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

LOPES, Manuela de Mesquita; BRANCO, Verônica T. F. Castelo; SOARES, Jorge Barbosa. Utilização dos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação. TRANSPORTES, v. 21, n. 1, p. 59-66, 2013.

LUZZI, Felipe Cipriani. Adaptação de usina para reciclagem à quente e avaliação laboratorial das misturas asfálticas produzidas. 187 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

MARTISIUS, M. Emissions Modelling for Hot Recycling at Asphalt Mixing Plants. In: THE 11th INTERNATIONAL CONFERENCE ENVIRONMENTAL ENGINEERING, 11., 2022. Proceedings. 2022.

MAZUMDER, M.; AHMED, R.; ALI, A. W.; LEE, S.-J. SEM and ESEM techniques used for analysis of asphalt binder and mixture: a state of the art review. Construction and Building Materials, v. 186, p. 313-329, 2018.

MENEZES, Sara Vieira; SOARES, Jorge Barbosa; BASTOS, Juceline Batista dos Santos. Análise laboratorial da incorporação de fresado em misturas asfálticas aplicadas em campo. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 33., 2019, Balneário Camboriú. Anais [...]. Balneário Camboriú: ANPET, 2019.

MULATU, Tiruwork; YIGEZU, Biruk; GEREMEW, Anteneh. Study on the Suitability of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate (RAPA) in Hot Mix Asphalt Production. Journal of Engineering Research, v. 11, p. 167-186, 2021.

OLIVEIRA, J. A. Avaliação do desempenho de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e em campo. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

OLIVEIRA, Matheus Silva. Análise da fadiga em misturas asfálticas recicladas a quente. 136 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

OLIVEIRA, Matheus Silva; FARIAS, Márcio Muniz; SILVA, João Paulo Souza. Fatigue analysis of hot recycled asphalt mixtures with RAP incorporation. Case Studies in Construction Materials, 2022.

PEREIRA, Alex Gomes. Desenvolvimento de misturas asfálticas contendo material fresado e ligante asfáltico modificado com grafite. 153 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2023.

PEREIRA, Igor Nonato Almeida. Análise econômica da produção de misturas asfálticas com cinza de termelétrica, biochar e bioóleo. 87 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2020.

PINHEIRO, Gustavo dos Santos. Avaliação do processo de extração e recuperação de ligantes asfálticos na dosagem de misturas recicladas a quente. 137 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

PINHEIRO, J. H. M. Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias (processos úmido e seco). 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

REIS, Ana Carolina da Cruz. Propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas em usina protótipo de escala reduzida. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.

SANTOLINI, E.; TARSI, G.; TORREGGIANI, D.; SANGIORGI, C. 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*, v. 448, p. 141-380, 2024.

SANTOS, E. F. dos; FERNANDES JUNIOR, J. L. Avaliação do módulo de resiliência de misturas asfálticas com granulometria definida pela faixa de agregados dominantes. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 34., 2020, 100% Digital. Anais [...]. Rio de Janeiro: ANPET, 2020. p. 1334-1343.

SANTOS, K. P.; LUCENA, A. E. F. L.; LUCENA, L. C. F. L.; SILVA, J. A. A.; COSTA, S. C. F. E. Estudo da incorporação de argilas montmorilonitas em cimentos asfálticos de petróleo. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 501-513, jun. 2015. DOI: 10.1590/S1517-707620150002.0050.

SANTOS, T. B. dos; LOURENÇO, V. M. Q. Análise de técnica de mistura asfáltica tipo concreto asfáltico usinado a quente com utilização de escória como agregado miúdo. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 32., 2018, Gramado. Anais [...]. Rio de Janeiro: ANPET, 2018. p. 1578-1585.

SHARMA, A.; RANSINCHUNG, G. D.; KUMAR, P.; KUMAR, D. S. N. V. A. Design Mixture of RAP-HMA Pavements: A review. *Materials Science and Engineering*, v. 1070, 2021.

SHARMA, Ankit; NAGA, Gondaimei R. R.; KUMAR, Praveen; RAI, Priti. Mix design, development, production and policies of recycled hot mix asphalt: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2022.

SUZUKI, Karina Yuriko. Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

TRINH, L. T.; PHAM, T. V.; BAC, B. H.; BUI, N. T.; NGUYEN, H. M. T.; NGUYEN, M. D.; NGUYEN, H. T. T. Some applications of Scanning Electron Microscopy to the study of reservoir rock. *Journal of Mining and Earth Sciences*, v. 64, n. 3, p. 32-40, 2023.

VIDAL, G. V.; FLOODY, A. C.; ALONSO, E. S.; DÍAZ, C.; FONSECA, C. Highway trial sections: Performance evaluation of warm mix asphalt and recycled warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 2020.

WHITE, Greg; FAIRWATHER, Helen; JAMSHIDI, Ali. Sustainable runway pavement rehabilitation: A case study of an Australian airport. *Journal of Cleaner Production*, v. 204, p. 380-389, set. 2018.

YANG, Chao; ZHANG, Jianwei; YANG, Fei; CHENG, Ming; WANG, Yafei; AMIRKHANIAN, Serji; WU, Shaopeng; WEI, Minghua; XIE, Jun. Multi-scale performance evaluation and correlation analysis of blended asphalt and recycled asphalt mixtures incorporating high RAP content. *Journal of Cleaner Production*, v. 317, 128278, 2021.

YANG, J. et al. Laboratory Investigation of Compaction Characteristics of Plant Recycled Hot-Mix Asphalt Mixture. *Sustainability*, v. 13, n. 6, 3005, 2021.

YOUSEFI, A. A. et al. Performance of warm asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement, an anti-stripping agent, and recycling agents: a study using a balanced mix design approach. *Construction and Building Materials*, v. 363, p. 129633, 2023.

ZALGHOUT, A. et al. Laboratory and field evaluation of plant produced asphalt mixtures containing RAP in hot climate: A case study from Phoenix, Arizona. *Construction and Building Materials*, v. 351, 128322, 2022.

ZUBARAN, Marcelo. Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto. 151 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.