



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA URBANA



Gustavo Fernandes Teixeira

Reciclagem de asfalto fresado (RAP) em misturas asfálticas:
desempenho e implicações para a gestão de resíduos na
manutenção viária

Ouro Preto

2026

Gustavo Fernandes Teixeira

Reciclagem de asfalto fresado (RAP) em misturas asfálticas:
desempenho e implicações para a gestão de resíduos na
manutenção viária

Projeto Final de Curso apresentado como parte
dos requisitos para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Urbana na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Dr. Eleonardo Lucas Pereira

Co-Orientador: Whilison Marques Mendonça

Ouro Preto

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T266r Teixeira, Gustavo Fernandes.

Reciclagem de asfalto fresado (RAP) em misturas asfálticas
[manuscrito]: desempenho e implicações para a gestão de resíduos na
manutenção viária. / Gustavo Fernandes Teixeira. - 2026.
92 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Eleonardo Lucas Pereira.

Coorientador: Me. Whilison Mendonça Mendonça.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia Urbana .

1. Planejamento urbano. 2. Gestão integrada de resíduos sólidos. 3.
Pavimentos. 4. Asfalto. I. Pereira, Eleonardo Lucas. II. Mendonça, Whilison
Mendonça. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 62:711.4

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - CRB6/2322



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gustavo Fernandes Teixeira

Reciclagem de asfalto fresado (rap) em misturas asfálticas: desempenho e implicações para a gestão de resíduos na manutenção viária

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Urbanista

Aprovada em 28 de agosto de 2026

Membros da banca

Doutor Eleonardo Lucas Pereira - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Mestre Whilson Marques Mendonça - Coorientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutor Lucas Deleon Ferreira (Universidade Federal de Ouro Preto)
Mestre Diogo Reis Stavaux Baudson (Universidade Federal de Ouro Preto)

Eleonardo Lucas Pereira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 11/08/2026



Documento assinado eletronicamente por **Eleonardo Lucas Pereira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/08/2026, às 17:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1159746** e o código CRC **AE8453B6**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo desta trajetória acadêmica, especialmente nos momentos de dificuldade.

À minha família, agradeço pelo apoio incondicional, pelo incentivo constante, pela compreensão e por acreditarem em mim durante toda a caminhada. A presença e o carinho de vocês foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eleonardo Lucas Pereira, agradeço pela orientação, disponibilidade e pelos conhecimentos compartilhados durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador, Whilison Marques Mendonça, agradeço pelo auxílio técnico, pelas sugestões, pela atenção e pela contribuição na organização e interpretação dos dados desta pesquisa.

Aos técnicos dos laboratórios da Universidade Federal de Ouro Preto, agradeço pelo suporte na realização dos ensaios e pela disponibilidade ao longo das atividades experimentais.

À Universidade Federal de Ouro Preto e à Escola de Minas, agradeço pela formação acadêmica e pelas oportunidades proporcionadas durante a graduação.

À Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação (PROPI) e à EMBRAPPI, agradeço pelo apoio e pela oportunidade de participação em projetos de Iniciação Científica, que contribuíram significativamente para minha formação e para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão desta etapa da minha vida.

“O sonho te traz coisas que te faz prosseguir.”

(Emicida)

RESUMO

A manutenção e a reabilitação de pavimentos asfálticos geram volumes expressivos de asfalto fresado, denominado Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), material que pode representar tanto um passivo ambiental quanto um insumo potencial para novas misturas asfálticas. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da incorporação de RAP em misturas asfálticas destinadas à camada de rolamento, utilizando agregado mineral de gnaiss como material virgem convencional, e relacionar essa aplicação à gestão de resíduos sólidos na manutenção viária. A pesquisa foi desenvolvida a partir de resultados experimentais obtidos em Iniciação Científica, envolvendo a caracterização dos materiais, a dosagem de misturas com diferentes teores de RAP, com e sem adição de agente rejuvenescedor, e a avaliação mecânica por meio dos ensaios de estabilidade e fluência Marshall e resistência à tração por compressão diametral. De forma complementar, foram realizadas análise de custos, determinação da massa unitária em estado solto e simulação para quantificação volumétrica e mássica do RAP gerado em serviços de fresagem, com base nos documentos técnicos do Programa Conserva Pro. Os resultados indicaram que as misturas com RAP sem rejuvenescedor apresentaram, em geral, melhor desempenho mecânico, com destaque para a formulação com 40% de RAP, que demonstrou comportamento mais equilibrado entre resistência, estabilidade e atendimento aos parâmetros volumétricos. A análise econômica evidenciou reduções progressivas de custo com o aumento do teor de RAP, embora a alternativa de menor custo não tenha sido necessariamente a mais adequada tecnicamente. Na simulação aplicada, estimou-se que a fresagem de seis lotes poderia gerar aproximadamente 14.400 m³ de material compactado, equivalentes a 33.595,2 toneladas de RAP, passando a ocupar cerca de 25.692,85 m³ em estado solto, com demanda estimada de 2.570 viagens de caminhão. Conclui-se que o RAP apresenta potencial de reaproveitamento em misturas asfálticas, desde que associado a controle tecnológico adequado, e que sua quantificação pode auxiliar no planejamento logístico, na gestão de resíduos, na redução de passivos ambientais e na formulação de práticas mais sustentáveis para a infraestrutura viária.

Palavras-chave: Asfalto fresado; RAP; misturas asfálticas recicladas; pavimentação asfáltica; agente rejuvenescedor; estabilidade Marshall; resistência à tração por compressão diametral; gestão de resíduos; planejamento urbano.

ABSTRACT

Maintenance and rehabilitation activities on asphalt pavements generate significant volumes of reclaimed asphalt pavement (RAP), a material that may represent both an environmental liability and a potential input for new asphalt mixtures. In this context, this study aimed to analyze the technical, economic, and environmental feasibility of incorporating RAP into asphalt mixtures for wearing courses, using gneiss as the conventional virgin mineral aggregate, and to relate this application to solid waste management in road maintenance. The research was based on experimental results obtained during a Scientific Initiation project, including material characterization, mix design with different RAP contents, with and without the addition of a rejuvenating agent, and mechanical evaluation through Marshall stability and flow tests and indirect tensile strength tests. In addition, a cost analysis, loose bulk density determination, and a volumetric and mass quantification simulation of RAP generated by milling services were carried out based on technical documents from the Conserva Pro Program. The results indicated that mixtures containing RAP without rejuvenator generally showed better mechanical performance, especially the mixture with 40% RAP, which presented the most balanced behavior regarding strength, stability, and compliance with volumetric parameters. The economic analysis showed progressive cost reductions as the RAP content increased, although the lowest-cost alternative was not necessarily the most technically suitable. In the applied simulation, it was estimated that milling six lots could generate approximately 14,400 m³ of compacted material, equivalent to 33,595.2 tons of RAP, which would occupy about 25,692.85 m³ in loose condition, requiring an estimated 2,570 truck trips. It is concluded that RAP has potential for reuse in asphalt mixtures, provided that adequate technological control is applied, and that its quantification can support logistical planning, waste management, reduction of environmental liabilities, and the development of more sustainable practices for road infrastructure.

Keywords: Reclaimed asphalt pavement; RAP; recycled asphalt mixtures; asphalt pavement; rejuvenating agent; Marshall stability; indirect tensile strength; waste management; urban planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pesagem para ensaio de equivalente de areia com o RAP.....	26
Figura 2 - Massa específica de agregado graúdo (a) e agregado miúdo (b).....	27
Figuras 3 e 4 - Quarteamento e separação do material.....	28
Figura 5 - Peneiramento da brita 1.....	29
Figura 6 - Série de peneiras.....	29
Figura 7 - Peneiramento da brita 0.....	30
Figura 8 - Ensaio Equivalente de areia.....	31
Figura 9 - Medição com paquímetro para o índice de forma.....	31
Figura 10 - Medição com crivo para o índice de forma.....	32
Figura 11 - Ensaio de massa específica.....	32
Figura 12 - Ensaio de abrasão de Los Angeles.....	33
Figura 13 - Aparelho Treton.....	34
Figura 14 - Ensaio de adesividade ao ligante.....	35
Figura 15 - Requisitos para projeto de concreto asfáltico.....	40
Figura 16 - Ensaio de Gmm.....	41
Figura 17 - Ensaio de estabilidade e fluência Marshall.....	42
Figura 18 - Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	45
Figura 19 - Ensaio de determinação da massa unitária.....	48
Figura 20 - Curva granulométrica do Pó de pedra.....	54
Figura 21 - Curva granulométrica da Brita 0.....	55
Figura 22 - Curva granulométrica da Brita 1.....	55
Figura 23 - Ensaio de adesividade.....	60
Figura 24 - Parâmetros da Dosagem 40% de RAP com 0% de Rejuvenescedor.....	61
Figura 25 - Volume de Vazios e relação betume-vazios da mistura com 30% de RAP e 0% de rejuvenescedor.....	64
Figura 26 - Vazios do Agregado Mineral da mistura com 40% de RAP e 0% de rejuvenescedor.....	65
Figura 27 - Relação Filler/Asfalto (a) Mistura com 30% de RAP e 0% de rejuvenescedor; (b) Mistura com 30% de RAP e 3% de rejuvenescedor; (c) Mistura com 40% de RAP e 0% de rejuvenescedor; (d) Mistura com 40% de RAP e 3% de rejuvenescedor.....	66
Figura 28 - Relação entre massas específicas e teor de ligante da mistura com 40% de RAP e 3% de rejuvenescedor.....	68
Figura 29 - Resistência à tração por compressão diametral das misturas estudadas.....	69
Figura 30 - Gráfico de Relação de Custos.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio de caracterização.....	53
Tabela 2 - Índice de forma (paquímetro e crivo).....	58
Tabela 3 - Resultados obtidos a partir da produção das misturas asfálticas.....	61
Tabela 4 - Resultados obtidos a partir da produção das misturas asfálticas.....	62
Tabela 5 - Comparação de preços para cada mistura asfáltica, tendo como base o ligante asfáltico.....	73
Tabela 6 - Comparação de preços para cada mistura asfáltica, tendo como base o agregado de gnaíse.....	74
Tabela 7 - Comparação de preços para cada mistura asfáltica.....	75

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1 OBJETIVOS.....	13
1.2 JUSTIFICATIVA.....	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1 Pavimentação asfáltica e desempenho mecânico das misturas.....	16
2.2 Asfalto fresado (RAP) em misturas asfálticas.....	17
2.3 Uso de rejuvenescedores e compatibilização de ligantes.....	18
2.4 Agregados minerais convencionais e sua influência no desempenho das misturas asfálticas.....	19
2.5 Integração entre pavimentação, sustentabilidade e planejamento urbano.....	20
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	23
3.1. Materiais Utilizados.....	23
3.2. Caracterização dos Materiais.....	24
3.2.1 Caracterização Tecnológica do RAP.....	24
3.2.2 Caracterização dos Agregados Virgens e do Ligante Asfáltico.....	27
3.2.2.1 Caracterização dos Agregados Virgens.....	27
3.2.2.2 Caracterização do Ligante Asfáltico.....	35
3.2.3 Agente rejuvenescedor.....	36
3.3 Dosagem e Produção das Misturas Asfálticas.....	36
3.4 Ensaios Mecânicos das Misturas Asfálticas.....	41
3.4.1 Ensaio de estabilidade e fluência Marshall.....	42
3.4.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD).....	43
3.5 Análise de custos.....	45
3.6 Determinação da massa unitária de agregados em estado solto.....	46
3.7 Simulação para quantificação volumétrica de resíduos sólidos de fresagem (RAP)....	49
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	51
4.1. Caracterização dos agregados virgens.....	52
4.1.1. Interpretação dos resultados.....	54
4.2. Dosagem e resistência das misturas asfálticas.....	60
4.2.1. Interpretação dos resultados.....	63
4.3. Análise de custos.....	72
4.4. Determinação da massa unitária de agregados em estado solto.....	76
4.5. Simulação para quantificação volumétrica de resíduos sólidos de fresagem (RAP)...	77
5. CONCLUSÃO.....	80
6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	83
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

1. INTRODUÇÃO

O aumento das solicitações de tráfego e das demandas operacionais sobre a infraestrutura viária tem imposto desafios à durabilidade dos pavimentos e ampliado a necessidade de intervenções de manutenção (Bernucci et al., 2022). A pavimentação asfáltica, amplamente utilizada em rodovias e vias urbanas, desempenha papel central na mobilidade, na logística e no ordenamento territorial, tornando sua conservação um tema estratégico tanto sob a ótica da engenharia quanto do planejamento urbano (Qiao et al., 2020). No âmbito das agendas globais de desenvolvimento, a Agenda 2030 estabelece um plano de ação orientado à sustentabilidade, incluindo objetivos vinculados à infraestrutura, às cidades e ao uso responsável de recursos, o que reforça a atualidade do debate sobre conservação viária e gestão de materiais no ciclo de vida das obras (ONU, 2015). Nesse contexto, este trabalho tem como foco analisar o reaproveitamento do asfalto fresado em misturas asfálticas e suas implicações técnicas, econômicas e ambientais para a gestão de resíduos na manutenção viária.

As atividades de manutenção viária, em especial o recapeamento asfáltico, envolvem processos como a fresagem do revestimento deteriorado, que resulta na geração de grandes volumes de resíduos sólidos, conhecidos como asfalto fresado ou Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), que pode ser traduzido como “pavimento asfáltico recuperado”. Esse material, ao mesmo tempo em que representa um desafio para a gestão urbana de resíduos, constitui um insumo potencial para a reciclagem em novas misturas asfálticas, contribuindo para a redução do consumo de agregados naturais e para a mitigação de impactos ambientais associados à extração mineral (Bernucci et al., 2022). Em escala internacional, documentos técnicos e revisões de referência indicam que a reutilização do RAP em misturas asfálticas reduz a demanda por agregados e ligante asfáltico virgens e pode minimizar a destinação do material fresado, desde que o RAP seja adequadamente caracterizado, processado e incorporado com práticas consistentes de dosagem e controle tecnológico compatíveis com o desempenho esperado da camada (FHWA, 2011; Tsakoumaki; Plati, 2024).

Nesse contexto, a incorporação de asfalto fresado em misturas asfálticas tem sido amplamente investigada na engenharia de pavimentos, com destaque para seus efeitos sobre o desempenho mecânico, a durabilidade e a sustentabilidade das estruturas viárias. A literatura evidencia que o RAP tende a elevar a rigidez das misturas em função do ligante envelhecido, o que pode favorecer a resistência ao afundamento em trilha de roda em condições de

temperatura mais elevada. Por outro lado, os resultados não são necessariamente convergentes quanto ao comportamento à fadiga e ao trincamento, sobretudo quando se elevam os teores incorporados e não se controlam adequadamente os parâmetros de dosagem e produção (Abu Abdo, 2016).

De forma complementar, o agregado mineral considerado neste estudo está associado ao gnaiss, rocha metamórfica amplamente empregada como agregado na pavimentação e que, por apresentar caráter mais silicoso, demanda avaliações técnicas cuidadosas quanto à interação com o ligante e à suscetibilidade à umidade, a depender das condições de dosagem e serviço (Bernucci et al., 2022). Além disso, análises de práticas internacionais indicam que, apesar do avanço da reciclagem, o teor de RAP em camadas asfálticas ainda se mantém, em muitos contextos, em níveis moderados, por exemplo em torno de 30%, refletindo a necessidade de diretrizes e padronizações mais consistentes para ampliar seu uso sem comprometer desempenho e durabilidade (Tsakoumaki; Plati, 2024).

Nesse sentido, a discussão sobre a reciclagem de materiais asfálticos deve considerar o contexto institucional no qual as atividades de manutenção viária são executadas e os marcos normativos que orientam a destinação dos resíduos gerados. No Brasil, os resíduos provenientes de obras de pavimentação são enquadrados como Resíduos da Construção Civil, com prioridade para reutilização e reciclagem, conforme estabelece a Resolução CONAMA nº 307/2002 (CONAMA, 2002). Em Minas Gerais, a conservação da malha rodoviária é conduzida por programas e documentos técnicos oficiais, como os instrumentos associados ao Conserva Pro, que organizam as intervenções por lotes e unidades regionais e especificam serviços recorrentes, como fresagem, remendos e recomposição do revestimento, evidenciando a escala das atividades de manutenção e, por consequência, a geração contínua de RAP ao longo da rede (DER-MG, 2023a; DER-MG, 2023b).

Do ponto de vista do planejamento urbano, a articulação entre políticas de gestão de resíduos e agendas de adaptação às mudanças climáticas é relevante, uma vez que estratégias integradas de governança territorial e eficiência de recursos tendem a fortalecer a capacidade de resposta a pressões ambientais. Nesse sentido, a Agenda 2030 incentiva a adoção de políticas e planos integrados voltados à mitigação e adaptação climática e, de modo convergente, à redução substancial da geração de resíduos por meio de prevenção, reciclagem e reuso (ONU, 2015). Assim, o reaproveitamento do RAP em misturas asfálticas não se restringe ao campo técnico da pavimentação, mas também se relaciona à gestão territorial, à

logística urbana, à redução de passivos ambientais e à racionalização do uso de recursos na manutenção da infraestrutura viária.

A base experimental deste Projeto Final de Curso foi desenvolvida durante a pesquisa de Iniciação Científica, na qual foram realizadas a caracterização dos materiais, a dosagem das misturas asfálticas com diferentes teores de RAP, com e sem adição de agente rejuvenescedor, e a avaliação do desempenho mecânico por meio dos ensaios de estabilidade e fluência Marshall e resistência à tração por compressão diametral (RTCD). Esses resultados forneceram a fundamentação técnica inicial para a análise da incorporação do RAP em misturas destinadas à camada de rolamento, utilizando agregado mineral de gnaiss como agregado virgem convencional.

Como ampliação do escopo experimental desenvolvido na Iniciação Científica, o presente trabalho incorporou uma etapa aplicada voltada à quantificação do RAP gerado em serviços de fresagem e à análise de suas implicações para a gestão de resíduos na manutenção viária. A partir do contexto real de intervenções de conservação e recapeamento, foi realizada uma simulação para estimar o quantitativo volumétrico de RAP gerado pela fresagem do revestimento asfáltico, utilizando como base a área contratual de fresagem indicada nos documentos técnicos do programa Conserva Pro e a espessura de 3 cm prevista para o serviço. Para isso, foram tomados como referência documentos técnicos do programa Conserva Pro, como o Termo de Referência e o Projeto Básico (DER-MG, 2023a; DER-MG, 2023b).

Para apoiar essa estimativa e reduzir incertezas associadas à conversão entre volume e massa do material, foi incorporado ao estudo o ensaio de determinação da massa unitária de agregados em estado solto, conforme o método DNIT 437/2022 – ME. Essa etapa metodológica subsidiou a análise do reaproveitamento do RAP e permitiu discutir, de forma mais objetiva, implicações de gestão e logística relacionadas ao transporte, armazenamento, destinação e possível reaproveitamento desse resíduo no próprio sistema viário.

Diante desse encadeamento entre os resultados experimentais obtidos durante a Iniciação Científica e sua aplicação em um cenário real de manutenção viária, o presente trabalho concentra-se na análise geotécnica da incorporação do RAP em misturas asfálticas destinadas à camada de rolamento, considerando também o desempenho dessas misturas em associação com agregados minerais de gnaiss. De forma complementar, o trabalho estabelece uma conexão com o planejamento urbano ao discutir a geração de resíduos sólidos

decorrentes da fresagem de pavimentos e a relevância de sua gestão adequada no contexto das políticas públicas de infraestrutura, sustentabilidade e ordenamento territorial.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo geral

Avaliar a viabilidade da incorporação de asfalto fresado (RAP) em misturas asfálticas destinadas à manutenção viária, considerando o desempenho mecânico, os parâmetros volumétricos e a análise de custos, de forma a subsidiar estratégias para o reaproveitamento desse material.

Objetivos específicos

- Caracterizar os materiais utilizados na pesquisa, incluindo o RAP, os agregados virgens e o ligante asfáltico, por meio de ensaios físicos e tecnológicos;
- Produzir misturas asfálticas com diferentes teores de RAP e de agente rejuvenescedor, utilizando o método Marshall;
- Avaliar o desempenho das misturas por meio da determinação dos parâmetros volumétricos, da estabilidade e fluência Marshall e da resistência à tração por compressão diametral (RTCD);
- Comparar o desempenho das formulações produzidas, identificando a influência dos diferentes teores de RAP e do agente rejuvenescedor;
- Analisar a viabilidade econômica da utilização do RAP na manutenção de pavimentos asfálticos;
- Determinar a massa unitária do RAP em estado solto e realizar uma simulação da geração, armazenamento e transporte do material fresado, visando contribuir para o planejamento das operações de manutenção viária.

1.2 JUSTIFICATIVA

A realização deste Projeto Final de Curso justifica-se pela necessidade de aprimorar práticas de manutenção e reabilitação de pavimentos asfálticos diante da condição ainda deficiente de parte significativa da malha rodoviária brasileira. A Pesquisa CNT de Rodovias 2025 avaliou 114.197 km de rodovias no país e indicou que, quanto ao pavimento, 37,0% da extensão pesquisada foi classificada como regular, 15,0% como ruim e 4,5% como péssima, além de apontar que 0,5% apresentava pavimento totalmente destruído. O mesmo levantamento estimou que seriam necessários R\$ 101,10 bilhões para recuperação das rodovias brasileiras, considerando ações emergenciais, reconstrução, restauração e manutenção (CNT, 2025a). Esses dados evidenciam a magnitude da demanda por intervenções de conservação e reabilitação, reforçando a importância de estudos voltados ao desempenho, ao custo e à sustentabilidade das soluções empregadas em pavimentação.

Esse cenário de degradação também se reflete na ocorrência de pontos críticos nas rodovias. Em 2025, foram registrados 2.146 pontos críticos na malha avaliada, sendo que os casos de “buraco grande” e “erosão na pista” representaram, juntos, 91,6% das ocorrências identificadas pela CNT. Além de comprometerem a segurança dos usuários, esses problemas interferem no fluxo normal do tráfego, elevam custos operacionais e indicam a necessidade de intervenções corretivas e preventivas mais eficientes (CNT, 2025b). Dessa forma, a manutenção viária deixa de ser apenas uma demanda operacional e passa a ser também uma questão de planejamento da infraestrutura, uma vez que envolve alocação de recursos, definição de prioridades, escolha de materiais e controle dos impactos gerados durante as obras.

Entre as atividades de manutenção e reabilitação de pavimentos, a fresagem asfáltica assume papel relevante por permitir a remoção de camadas deterioradas do revestimento, mas também por gerar volumes expressivos de asfalto fresado, denominado Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Quando esse material não é adequadamente caracterizado, armazenado ou reaproveitado, sua destinação pode representar desperdício de agregados e ligante asfáltico já incorporados ao pavimento, além de ampliar demandas por transporte, áreas de disposição e controle ambiental. No Brasil, os resíduos provenientes de obras de pavimentação se enquadram no contexto dos Resíduos da Construção Civil, para os quais a Resolução CONAMA nº 307/2002 estabelece diretrizes de gerenciamento e prioriza a reutilização e a reciclagem quando tecnicamente viáveis (CONAMA, 2002).

Do ponto de vista técnico, a utilização de RAP em misturas asfálticas ainda exige avaliação criteriosa, pois o material apresenta variabilidade associada à origem, ao teor de ligante residual, ao grau de envelhecimento do ligante e às características granulométricas dos agregados recuperados. Além disso, o uso de maiores teores de RAP e a eventual adição de agentes rejuvenescedores podem alterar o comportamento mecânico e volumétrico das misturas, influenciando parâmetros como estabilidade Marshall, fluência, resistência à tração por compressão diametral, volume de vazios, relação betume-vazios e relação filler/asfalto. Assim, torna-se necessário investigar em que condições o material fresado pode ser reincorporado às misturas sem comprometer o desempenho da camada de rolamento.

Nesse contexto, o presente trabalho se justifica por articular uma demanda prática da infraestrutura viária com uma análise técnica, econômica e ambiental do reaproveitamento do RAP. A pesquisa parte dos resultados experimentais desenvolvidos na Iniciação Científica, referentes à caracterização dos materiais, à dosagem de misturas asfálticas com diferentes teores de RAP e à avaliação mecânica das formulações com e sem agente rejuvenescedor. A partir dessa base, o estudo incorpora uma etapa aplicada de quantificação volumétrica e mássica do material fresado, utilizando documentos técnicos do Programa Conserva Pro, de modo a relacionar o desempenho das misturas com a escala de geração de resíduos em serviços reais de manutenção viária (DER-MG, 2023a; DER-MG, 2023b).

Dessa forma, a relevância do trabalho está em contribuir para a compreensão do RAP não apenas como um resíduo decorrente da fresagem, mas como um material com potencial de reaproveitamento no próprio ciclo produtivo da pavimentação. Ao integrar desempenho mecânico, análise econômica, quantificação de resíduos e diretrizes de gestão ambiental, o estudo oferece subsídios para práticas de manutenção viária mais eficientes, com menor pressão sobre o consumo de agregados e ligantes virgens, menor geração de passivos ambientais e maior alinhamento com princípios de planejamento urbano, sustentabilidade e economia circular aplicados à infraestrutura rodoviária.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo reúne a fundamentação teórica que embasa o trabalho. Inicialmente, são apresentados os conceitos de desempenho mecânico de misturas asfálticas e os principais critérios de avaliação associados à resistência, deformabilidade e durabilidade. Em seguida,

discute-se o uso do asfalto fresado, denominado *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), em misturas recicladas, considerando sua variabilidade e seus efeitos no comportamento estrutural. Na sequência, aborda-se a aplicação de rejuvenescedores e a compatibilização entre ligantes, destacando a necessidade de calibração e controle tecnológico. Por fim, relaciona-se o reaproveitamento de materiais às diretrizes normativas, à sustentabilidade e à gestão dos resíduos gerados em intervenções de manutenção viária, como suporte à discussão de eficiência de recursos e redução de passivos ambientais.

2.1 Pavimentação asfáltica e desempenho mecânico das misturas

A pavimentação asfáltica é amplamente empregada em rodovias e vias urbanas devido à versatilidade construtiva, ao conforto ao rolamento e à facilidade de manutenção. Entretanto, o desempenho dessas estruturas depende diretamente das propriedades mecânicas das misturas asfálticas, que resultam da interação entre agregados, ligante asfáltico e condições de tráfego e clima. Nesse sentido, parâmetros como estabilidade Marshall, fluência Marshall, resistência à tração e, em análises mais avançadas, comportamento à fadiga, são relevantes para avaliar a capacidade estrutural e a durabilidade da camada de rolamento ao longo da vida útil, especialmente quando se busca reduzir defeitos associados à repetição de cargas e às variações ambientais (Bernucci et al., 2022). Além disso, mudanças em condições climáticas e ambientais podem alterar a performance e ampliar custos ao longo do ciclo de vida dos pavimentos, reforçando a necessidade de estratégias de adaptação e de maior eficiência na gestão da infraestrutura viária (Qiao et al., 2020).

Diante da necessidade de conciliar desempenho mecânico e sustentabilidade na manutenção viária, a incorporação de materiais reciclados, como o asfalto fresado (RAP), deve ser avaliada por critérios técnicos objetivos, sobretudo aqueles relacionados à capacidade resistente e à deformabilidade da mistura compactada. No ensaio Marshall, a estabilidade expressa a carga máxima suportada pelo corpo de prova, enquanto a fluência representa a deformação associada a essa carga; por isso, a interpretação conjunta desses parâmetros contribui para evitar misturas excessivamente rígidas, potencialmente mais frágeis, ou demasiadamente plásticas. Em estudo com 20% de RAP, por exemplo, observou-se estabilidade Marshall de 14,40 kN em comparação a 13,50 kN na mistura virgem, com fluência de 3,49 mm em comparação a 2,30 mm, indicando que o RAP pode elevar a resistência, mas exige controle da deformabilidade (Pradyumna et al., 2013). Em outra

aplicação, foram reportadas estabilidades de 15,8 kN e 8,0 kN, acima de um requisito mínimo de 5 kN, reforçando a importância de atender a patamares mínimos de resistência para viabilizar o emprego de materiais alternativos (Mendonça et al., 2024).

Complementarmente, a Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) é um parâmetro relevante para avaliar a resistência à tração da mistura asfáltica e inferir sua suscetibilidade ao trincamento, sendo determinada por procedimento normatizado (DNIT, 2018). Quanto aos critérios de aceitação, estes são usualmente estabelecidos nas especificações de serviço e projeto para concretos asfálticos, que definem valores mínimos de resistência à tração e demais limites de controle para garantir integridade mecânica e desempenho em campo (DER/SP, 2024). Nesse contexto, embora não tenham avaliado misturas com RAP, Mendonça et al. (2024) estudaram a aplicação de resíduo de quartzito em misturas asfálticas e reportaram valores de resistência à tração de $1,71 \pm 0,045$ MPa e $1,20 \pm 0,045$ MPa, compatíveis com a integridade mecânica das misturas analisadas. Esses resultados reforçam que a incorporação de materiais alternativos em misturas asfálticas deve ser avaliada por métricas comparáveis de desempenho e por critérios técnicos alinhados às condições de serviço.

2.2 Asfalto fresado (RAP) em misturas asfálticas

O asfalto fresado, denominado *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), é o material proveniente da fresagem de camadas asfálticas existentes e tem sido amplamente considerado como insumo para reciclagem em misturas a quente, sobretudo por reduzir o consumo de agregados e ligante virgem. Contudo, a literatura enfatiza que seu desempenho não depende apenas do teor incorporado, mas também da variabilidade do material, origem, grau de envelhecimento, teor e condição do ligante residual, graduação e possíveis contaminações, o que exige controle tecnológico e critérios de projeto compatíveis com a função estrutural da camada reciclada (Abu Abdo, 2016).

Do ponto de vista mecânico, a incorporação de RAP tende a elevar a rigidez da mistura devido ao ligante envelhecido e oxidado, podendo favorecer a resistência ao afundamento em trilha de roda em determinadas condições de temperatura e carregamento. Em contrapartida, quando o projeto não compensa adequadamente esse efeito, por exemplo, por meio da seleção de ligante de menor viscosidade, ajuste do teor de ligante efetivo e

controle de produção e compactação, o aumento de rigidez pode elevar a suscetibilidade ao trincamento e reduzir o desempenho à fadiga. Além disso, revisões recentes indicam que a mistura efetiva entre o ligante virgem e o ligante envelhecido do RAP pode ser apenas parcial, e a suposição de mistura completa sem verificação experimental pode introduzir heterogeneidades relevantes ao desempenho (Abu Abdo, 2016; Xing et al., 2023).

Em estudo laboratorial e em campo, Zalghout et al. (2022) avaliaram misturas produzidas em usina com 15% e 25% de RAP e indicaram que teores moderados podem manter desempenho comparável ao de misturas convencionais quando há controle de produção e ajuste do ligante. Os autores observaram que 15% de RAP não promoveu endurecimento relevante e que, mesmo com 25% de RAP, o uso de ligante de menor viscosidade, classificado como PG 64–16, contribuiu para manter a rigidez próxima à da mistura controle e melhorar a resistência ao sulcamento, sem penalização expressiva do comportamento de trincamento por fadiga, reforçando que a viabilidade do RAP deve ser sustentada por caracterização e verificação experimental do desempenho (Zalghout et al., 2022; Mendonça et al., 2024).

2.3 Uso de rejuvenescedores e compatibilização de ligantes

Como estratégia para mitigar os efeitos do envelhecimento do ligante presente no RAP, a literatura tem investigado a aplicação de agentes rejuvenescedores em misturas asfálticas recicladas. Em termos gerais, esses aditivos buscam reduzir a rigidez do ligante oxidado e reequilibrar propriedades reológicas associadas à trabalhabilidade e à capacidade de deformação, o que pode contribuir para melhorar o desempenho mecânico da mistura, sobretudo quando o teor de RAP é elevado e o ligante recuperado passa a influenciar de forma mais intensa o comportamento do material.

Entretanto, os resultados não são uniformes e dependem, principalmente, da compatibilidade entre o produto e o ligante envelhecido, bem como da dosagem adotada, que deve ser calibrada com base em parâmetros do ligante, como viscosidade e critérios reológicos. Em ligante recuperado, Pradyumna et al. (2013) avaliaram diferentes teores de agente e indicaram 10% como dosagem ótima, observando redução de viscosidade a 60 °C de 2820 para 2420 Poise, unidade do sistema cgs para viscosidade dinâmica, evidenciando o efeito de amolecimento do ligante envelhecido. Em abordagem semelhante para

rejuvenescedores à base de óleo, Suo et al. (2021) utilizaram o grau de desempenho do ligante (PG) como referência de restauração e apontaram dosagens típicas de 4% para óleo vegetal e 8% para óleo mineral para recuperar propriedades compatíveis com um ligante-alvo, destacando ainda que teores elevados não são recomendáveis por reduzirem o ganho incremental de redução de viscosidade e elevarem custos.

Além da seleção e do teor do rejuvenescedor, um ponto crítico é a compatibilização efetiva entre o ligante virgem e o ligante envelhecido presente no RAP. Revisões recentes indicam que a mistura entre ligantes pode ser parcial, de modo que a suposição de interação completa sem verificação experimental pode introduzir incertezas no projeto e no desempenho, especialmente quanto ao balanço entre rigidez, trincamento e fadiga (Xing et al., 2023). Assim, o uso de rejuvenescedores deve ser tratado como parte de um sistema de dosagem e controle tecnológico, no qual a escolha do produto, a definição do teor e as condições de mistura sejam compatíveis com as metas de desempenho da mistura reciclada (Pradyumna et al., 2013; Suo et al., 2021; Xing et al., 2023).

Nesse contexto, os agentes rejuvenescedores podem ser classificados de acordo com sua origem e composição química, destacando-se os óleos de origem vegetal, os derivados do petróleo, os óleos aromáticos, os bio-óleos produzidos a partir de biomassa e os produtos formulados comercialmente. De maneira geral, esses materiais atuam restaurando parte dos componentes leves perdidos durante o envelhecimento oxidativo do ligante asfáltico, reduzindo sua rigidez e recuperando propriedades como trabalhabilidade, flexibilidade e resistência ao trincamento. Entretanto, sua eficiência está diretamente relacionada ao tipo de rejuvenescedor empregado, à compatibilidade com o ligante envelhecido, à dosagem utilizada e às condições de mistura, sendo necessário um controle adequado para evitar a perda excessiva de rigidez e o comprometimento do desempenho mecânico da mistura asfáltica (JAHANGIRI et al., 2020).

2.4 Agregados minerais convencionais e sua influência no desempenho das misturas asfálticas

Os agregados minerais exercem papel fundamental no desempenho das misturas asfálticas, uma vez que constituem a maior parte de sua composição e formam o esqueleto granular responsável por resistir aos esforços impostos pelo tráfego. Segundo Bernucci et al.

(2022), a seleção dos agregados deve considerar propriedades associadas à rocha de origem, como composição mineralógica, granulação, grau de alteração, resistência à degradação, abrasão ou fratura, além do potencial de adesão do ligante asfáltico à superfície mineral. Dessa forma, a escolha adequada dos agregados é essencial para garantir estabilidade, durabilidade, trabalhabilidade e desempenho estrutural compatível com as condições de serviço do pavimento.

Entre as características tecnológicas mais relevantes, destacam-se a granulometria, a forma das partículas, a textura superficial, a massa específica, a absorção, a resistência ao desgaste e a adesividade ao ligante. A distribuição granulométrica influencia o empacotamento dos grãos e os parâmetros volumétricos da mistura, enquanto partículas com forma e textura adequadas favorecem o intertravamento granular e a estabilidade mecânica. Além disso, a massa específica e a absorção dos agregados interferem nos cálculos volumétricos e na definição do teor de ligante, uma vez que a dosagem de misturas asfálticas depende da relação entre massa e volume dos seus constituintes (Bernucci et al., 2022).

No presente trabalho, o gnaiss é tratado como agregado mineral virgem convencional empregado na composição das misturas asfálticas, enquanto o RAP constitui o principal material reciclado avaliado. Essa distinção é importante porque o estudo não se concentra no reaproveitamento de resíduos de rochas ornamentais, mas sim na incorporação do asfalto fresado em novas misturas, utilizando o gnaiss como material de referência para a estrutura granular. Assim, a caracterização dos agregados convencionais torna-se necessária para compreender sua contribuição ao desempenho das misturas com diferentes teores de RAP e para subsidiar a avaliação técnica do reaproveitamento do material fresado em camadas de rolamento.

2.5 Integração entre pavimentação, sustentabilidade e planejamento urbano

A incorporação de materiais reciclados em misturas asfálticas, como o asfalto fresado, e a discussão sobre materiais minerais alternativos extrapolam o campo estritamente técnico da engenharia de pavimentos e inserem-se em um contexto mais amplo de gestão territorial e planejamento urbano. As atividades de manutenção viária, em especial aquelas associadas à fresagem de pavimentos, configuram-se como fontes recorrentes de geração de resíduos

sólidos, cuja destinação inadequada pode resultar em impactos ambientais, sobrecarga de áreas de disposição e conflitos com o uso e a ocupação do solo urbano.

Sob a ótica normativa, no Brasil, os resíduos oriundos de obras de pavimentação são enquadrados no escopo dos Resíduos da Construção Civil (RCC), conforme estabelecido pela Resolução CONAMA nº 307/2002, que orienta a priorização de práticas de reutilização e reciclagem sempre que tecnicamente viáveis. Esse marco regulatório é relevante ao reconhecer o potencial de reaproveitamento dos resíduos de pavimentação e, simultaneamente, atribuir responsabilidades aos geradores e ao poder público quanto ao manejo adequado desses fluxos, integrando dimensões técnicas, ambientais e administrativas (CONAMA, 2002).

Nesse contexto, os instrumentos de planejamento urbano e de gestão de resíduos sólidos assumem papel estratégico na organização e no direcionamento das ações de manejo dos resíduos provenientes da infraestrutura viária. Os Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), elaborados em consonância com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelecem diretrizes para a segregação, o transporte, o armazenamento temporário e a destinação dos RCC, incluindo aqueles gerados em serviços de conservação e reabilitação de pavimentos. Assim, a efetividade desses planos depende da articulação entre planejamento territorial, capacidade logística e adoção de soluções técnicas que viabilizem a reinserção de resíduos nos ciclos produtivos da construção e da própria pavimentação, reduzindo passivos e aumentando eficiência operacional (Aquino; Dias, 2025).

No âmbito estadual, a execução sistemática das atividades de manutenção rodoviária evidencia a relevância dessa integração entre engenharia e planejamento. Em Minas Gerais, programas públicos como o Conserva Pro estruturam intervenções de conservação por meio de lotes regionais e unidades administrativas, envolvendo serviços recorrentes de fresagem, remendos e recomposição do revestimento asfáltico, conforme definido em Termos de Referência e Projetos Básicos. A magnitude dessas intervenções implica geração contínua de volumes expressivos de material fresado, reforçando a necessidade de estratégias previamente planejadas para seu reaproveitamento, de modo a racionalizar o uso de recursos e reduzir a dependência de áreas de disposição (DER-MG, 2023a; DER-MG, 2023b).

Sob a ótica do planejamento urbano contemporâneo, a gestão de resíduos de pavimentação também se relaciona às agendas de sustentabilidade e adaptação às mudanças

climáticas. A reciclagem e a reinserção de materiais na infraestrutura urbana tendem a contribuir para a mitigação de impactos ambientais, ao reduzir demandas associadas à cadeia de suprimento de matérias-primas, como extração, processamento e transporte, e, consequentemente, pressões e emissões associadas ao ciclo de vida da infraestrutura. Estudos voltados à avaliação de impactos e custos ao longo do ciclo de vida de pavimentos, bem como análises sobre a interface entre gestão de resíduos e mudanças climáticas, sustentam a relevância de estratégias de reaproveitamento como parte de abordagens mais eficientes e ambientalmente responsáveis (Qiao et al., 2020; Meireles, 2023). Nesse sentido, a incorporação do RAP em misturas asfálticas pode ser compreendida como prática alinhada aos princípios da economia circular aplicados ao ambiente urbano.

Essa abordagem dialoga, ainda, com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, especialmente com o ODS 9, que trata da construção de infraestruturas resilientes e sustentáveis, com o ODS 11, voltado a cidades e assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis, e com o ODS 12, que busca assegurar padrões sustentáveis de produção e consumo (ONU, 2015). No contexto deste trabalho, esses objetivos se relacionam diretamente à discussão sobre reciclagem de materiais, redução da geração de resíduos, racionalização do uso de recursos naturais e melhoria da gestão da infraestrutura viária. A partir dessas considerações, a análise do reaproveitamento do asfalto fresado, além de fundamentar-se em critérios geotécnicos e de desempenho mecânico, insere-se em um quadro mais amplo de gestão urbana da infraestrutura. Nesse sentido, a estimativa volumétrica do RAP gerado por fresagem contribui para aproximar a avaliação experimental do material de questões práticas de planejamento, como transporte, armazenamento, reaproveitamento e redução da destinação inadequada. Ao articular resultados experimentais da engenharia de pavimentos com diretrizes normativas, instrumentos de planejamento e políticas públicas, o presente trabalho contribui para uma compreensão integrada da pavimentação asfáltica como elemento estrutural do território urbano, reforçando seu papel na construção de sistemas viários mais sustentáveis, eficientes e territorialmente planejados.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A pesquisa foi desenvolvida com natureza aplicada e caráter experimental, pois partiu de uma problemática real da infraestrutura viária, relacionada à recorrência de intervenções de manutenção e à consequente geração de resíduos sólidos provenientes da fresagem de pavimentos asfálticos. Nesse sentido, o método do trabalho estruturou-se a partir de procedimentos laboratoriais de engenharia de pavimentos, voltados à caracterização de materiais e à avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas com incorporação de Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP), utilizando agregado mineral de gnaiss como agregado virgem convencional. Esses resultados foram articulados a uma abordagem aplicada relacionada à gestão do resíduo no contexto da manutenção viária.

Os ensaios laboratoriais executados durante a Iniciação Científica constituíram a base experimental deste PFC. Essa etapa envolveu a caracterização dos agregados e do material fresado, a dosagem e produção das misturas asfálticas com diferentes teores de RAP, com e sem adição de agente rejuvenescedor, e a avaliação mecânica das misturas por meio dos ensaios de estabilidade e fluência Marshall e resistência à tração por compressão diametral (RTCD).

Como continuidade do estudo, foram acrescentados dois componentes metodológicos complementares. O primeiro consistiu na determinação da massa unitária de agregados em estado solto, conforme o método DNIT 437/2022 – ME, com o objetivo de subsidiar a conversão entre volume e massa, especialmente para o RAP em condições compatíveis com transporte, estocagem e manuseio. O segundo componente correspondeu à simulação aplicada para estimativa volumétrica e mássica de resíduos gerados por fresagem, utilizando como base a área contratual de fresagem prevista nos documentos técnicos do programa Conserva Pro e a espessura indicada para remoção da camada asfáltica. Essa etapa permitiu aproximar os resultados laboratoriais de um cenário real de manutenção, ampliando a discussão sobre reaproveitamento, logística e gestão do RAP no sistema viário.

3.1. Materiais Utilizados

Na etapa experimental executada durante a Iniciação Científica, foram utilizados Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP), agregados minerais virgens, ligante asfáltico e aditivo rejuvenescedor. O RAP correspondeu ao material fresado proveniente da reabilitação

de pavimentos rodoviários, disponibilizado pelo Laboratório de Misturas Asfálticas do DECIV/UFOP. Esse material foi extraído da BR-356, no município de Ouro Preto (MG), durante obras de recuperação da camada de revestimento, sendo associado a um pavimento com idade aproximada de 15 anos.

Como agregado mineral virgem convencional, utilizou-se gnaiss britado, doado pela empresa Pedreira Irmãos Machado Ltda. e posteriormente caracterizado no Laboratório de Geotecnia de Pavimentos (CTGA/UFOP). O material doado totalizou 450 kg, distribuídos em 150 kg de brita 1, com dimensão entre 12,5 mm e 19 mm, 150 kg de brita 0, com dimensão entre 4,75 mm e 12,5 mm, e 150 kg de pó de pedra, com dimensão inferior a 4,75 mm. Essas frações granulométricas foram empregadas na composição das misturas asfálticas avaliadas.

O ligante empregado foi o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70, obtido no Laboratório de Geotecnia de Pavimentos (CTGA/UFOP), por meio de doação da empresa Stratura. Como agente rejuvenescedor, utilizou-se um aditivo comercial de origem vegetal para misturas asfálticas quentes com a finalidade de avaliar seu efeito na trabalhabilidade e no comportamento mecânico das misturas contendo RAP.

3.2. Caracterização dos Materiais

A caracterização dos materiais teve como finalidade estabelecer as propriedades físicas e tecnológicas necessárias ao controle de qualidade e à dosagem das misturas asfálticas. Essa etapa foi essencial para compreender o comportamento do RAP, dos agregados minerais de gnaiss, do ligante asfáltico e do agente rejuvenescedor, possibilitando a definição das composições de mistura e a posterior avaliação de desempenho.

O RAP é obtido a partir da fresagem de revestimentos asfálticos existentes e consiste, essencialmente, em agregados minerais recobertos por ligante asfáltico envelhecido. Sua composição pode refletir o histórico de serviço do pavimento original, bem como intervenções anteriores realizadas na via, incluindo a eventual presença de aditivos ou modificadores. Por essa razão, sua caracterização prévia é indispensável antes da incorporação em novas misturas asfálticas.

3.2.1 Caracterização Tecnológica do RAP

A caracterização tecnológica do RAP foi conduzida para quantificar sua condição e variabilidade, considerando aspectos como granulometria, teor e estado do ligante residual e possíveis particularidades relacionadas ao histórico de serviço do pavimento. Esses parâmetros constituíram a base para definir critérios de dosagem, ajustar a contribuição do ligante envelhecido e orientar o controle tecnológico durante a produção das misturas recicladas, garantindo maior reprodutibilidade e desempenho compatível com as condições de aplicação. Em função disso, o RAP foi submetido aos ensaios descritos a seguir.

Extração de ligante

A determinação do teor de ligante asfáltico presente no RAP foi realizada pelo método de ignição, utilizando o forno NCAT, em conformidade com as normas AASHTO T 308 e ASTM D6307. Nesse procedimento, o teor de ligante é obtido pela perda de massa da amostra durante a queima controlada da mistura, eliminando o uso de solventes e reduzindo a geração de resíduos químicos.

A amostra foi aquecida a aproximadamente 538 °C, enquanto o sistema de pesagem do equipamento registrou continuamente a variação de massa. Ao atingir massa constante, correspondente à estabilização da perda de massa, o ensaio foi finalizado automaticamente, permitindo calcular o percentual de ligante envelhecido presente no material avaliado.

Equivalente de areia

O ensaio de equivalente de areia (Figura 1) foi realizado para avaliar a presença de impurezas finas, como argilas e siltes, na fração miúda do material. Esses finos podem comprometer a adesão entre o ligante asfáltico e os agregados, reduzindo a resistência da mistura e aumentando o risco de desagregação prematura. O procedimento seguiu as diretrizes da DNER-ME 054/97.

Figura 1 - Pesagem para ensaio de equivalente de areia com o RAP.



Fonte: Autoral (2024).

Densidade e absorção dos agregados

A determinação da densidade e da absorção dos agregados, ilustrado na Figura 2, teve como objetivo obter a massa específica real, a massa específica aparente e a capacidade de absorção de água dos materiais. Esses parâmetros são fundamentais para o cálculo da dosagem volumétrica das misturas asfálticas, influenciando diretamente propriedades como volume de vazios, vazios do agregado mineral, relação betume-vazios e teor efetivo de ligante. Os procedimentos foram conduzidos conforme as normas DNIT 411/2011 e DNIT 413/2019-ME.

Figura 2 - Massa específica de agregado graúdo (a) e agregado miúdo (b)



Fonte: Autoral (2024).

3.2.2 Caracterização dos Agregados Virgens e do Ligante Asfáltico

A caracterização dos agregados virgens e do ligante asfáltico teve como objetivo verificar a adequação desses materiais à produção das misturas asfálticas. No caso dos agregados minerais de gnaiss, empregados como agregados virgens convencionais, foram avaliadas propriedades relacionadas à distribuição granulométrica, forma das partículas, resistência ao desgaste, resistência ao impacto, densidade e absorção. Para o ligante asfáltico, foram consideradas suas características técnicas e sua compatibilidade com os agregados utilizados.

3.2.2.1 Caracterização dos Agregados Virgens

Análise granulométrica de agregados

O ensaio de análise granulométrica classifica os agregados conforme suas dimensões e determina a distribuição dos tamanhos das partículas, permitindo verificar o enquadramento do material nas faixas granulométricas especificadas para pavimentação. Esse controle é essencial porque a granulometria influencia diretamente a trabalhabilidade, a compactação e a estrutura interna da mistura asfáltica, refletindo no seu desempenho em campo (DNIT, 2018).

- **Quarteamento:** As frações de brita 0, brita 1 e pó de pedra de gnaiss foram submetidas ao quarteamento para obtenção de amostras reduzidas representativas, conforme apresentado nas Figuras 3 e 4. Esse procedimento tem como objetivo preservar a homogeneidade e a representatividade do material ao longo das subdivisões, minimizando a variabilidade introduzida pela redução da amostra e garantindo que os ensaios laboratoriais reflitam, com maior fidelidade, as propriedades do agregado utilizado no estudo.

Figuras 3 e 4 - Quarteamento e separação do material.



Fonte: Autoral (2024).

- **Análise granulométrica da brita 1:** realizada a partir de uma amostra de 10 kg, utilizando uma série de peneiras padronizadas (2", 1½", 1", ¾", ½", ⅜" e nº 4) (Figura 5). O procedimento permitiu determinar a distribuição do tamanho das partículas e verificar o enquadramento da fração nas especificações granulométricas adotadas para a composição das misturas.

Figura 5 - Peneiramento da brita 1.



Fonte: Autoral (2024).

- **Análise granulométrica da brita 0 (5 kg):** Similar à brita 1, a análise granulométrica da brita 0 foi conduzida para avaliar a distribuição das partículas, conforme ilustrado abaixo nas Figuras 6 e 7.

Figura 6 - Série de peneiras.

Série normal mm	Série normal polegada	Peneira n°
50,00	2	-
37,50	1 1/2	-
25,00	1	-
19,00	3/4	-
12,50	1/2	-
9,50	3/8	-
6,30	1/4	-
4,75	-	4
2,36	-	8
2,00	-	10
1,18	-	16
0,60	-	30
0,425	-	40
0,30	-	50
0,15	-	100
0,075	-	200

Fonte: DNIT 412/2019 - ME.

Figura 7 - Peneiramento da brita 0.



Fonte: Autoral (2024).

- **Análise granulométrica do pó de pedra (2 kg):** análise realizada com o objetivo de obter a curva granulométrica do material fino. Esse ensaio é essencial para verificar a adequação do pó de pedra como fração miúda na composição de misturas asfálticas, uma vez que sua distribuição de partículas influencia o empacotamento, a trabalhabilidade e os parâmetros volumétricos da mistura.

Equivalente de areia

Para avaliar a limpeza e a qualidade do agregado miúdo virgem empregado na mistura, realizou-se o ensaio de Equivalente de Areia conforme a DNER-ME 054/97, visando estimar a fração relativa de materiais finos potencialmente prejudiciais, como silte e argila, presentes no material (Figura 8). Teores elevados dessas partículas tendem a reduzir a afinidade agregado–ligante e a prejudicar a adesividade, o que pode refletir em queda de resistência e maior propensão à desagregação prematura da mistura asfáltica.

Figura 8 - Ensaio Equivalente de areia.



Fonte: Autoral (2024).

Índice de forma (paquímetro e crivo)

O ensaio de índice de forma, realizado com paquímetro e crivo, avaliou a morfologia das partículas dos agregados, identificando a proporção de grãos alongados e lamelares, os quais podem prejudicar o empacotamento, dificultar a compactação e reduzir a resistência mecânica da mistura (Figuras 9 e 10). Em pavimentação, busca-se maior predominância de partículas com forma mais cúbica, pois essa condição favorece melhor intertravamento e estrutura interna mais estável, contribuindo para o desempenho estrutural do revestimento (DNIT, 2020).

Figura 9 - Medição com paquímetro para o índice de forma.



Fonte: Autoral (2024).

Figura 10 - Medição com crivo para o índice de forma.



Fonte: Autoral (2024).

Densidade e absorção dos agregados: brita 1, brita 0 e pó de pedra

O ensaio determina a massa específica real e a massa específica aparente dos agregados, bem como a sua absorção de água, parâmetros indispensáveis para a dosagem volumétrica e para o controle do comportamento da mistura asfáltica (Figura 11). Esses resultados subsidiam o cálculo de propriedades como teor efetivo de ligante e índices volumétricos (por exemplo, V_v e VMA), influenciando a estabilidade e o desempenho do revestimento ao longo da vida útil (DNIT, 2011; DNIT, 2019).

Figura 11 - Ensaio de massa específica.



Fonte: Autoral (2024).

Abrasão Los Angeles

O ensaio de Abrasão Los Angeles avalia a resistência dos agregados graúdos à fragmentação e ao desgaste, simulando ações combinadas de impacto e abrasão associadas ao tráfego, sendo um parâmetro relevante para a seleção de materiais que assegurem durabilidade e estabilidade do revestimento asfáltico (Figura 12) (DNER-ME 035/98). Para a execução do ensaio, utilizou-se uma amostra total de 5,0 kg, composta por 2,5 kg de material com diâmetros entre 19,0 mm e 12,5 mm e 2,5 kg entre 12,5 mm e 9,5 mm, conforme a faixa granulométrica especificada no procedimento.

Figura 12 - Ensaio de abrasão de Los Angeles.

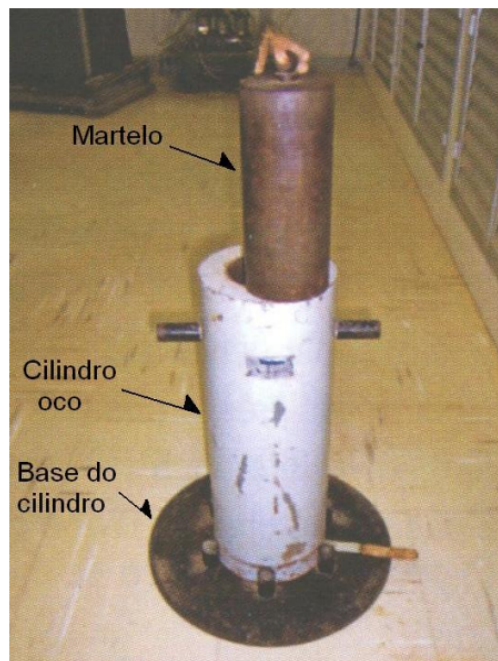


Fonte: Autoral (2024).

Ensaio da determinação da perda ao choque no aparelho Treton

O ensaio Treton, conforme a DNER-ME 399/99, determina a perda ao choque de agregados pétreos britados, avaliando sua resistência mecânica ao impacto (Figura 13). O procedimento é realizado no Aparelho Treton, no qual um martelo cilíndrico de 14,9 kg é liberado de uma altura de 39,37 cm sobre a amostra, aplicando-se 10 impactos sucessivos. Ao final, o material é peneirado e quantifica-se a fração desagregada, permitindo calcular a perda ao choque como percentual da massa inicial, parâmetro associado à durabilidade do agregado sob solicitações de impacto.

Figura 13 - Aparelho Treton.



Fonte: Viana (2018).

Ensaio de adesividade do agregado ao ligante asfáltico

O ensaio de adesividade do agregado ao ligante asfáltico, Figura 14, foi realizado com o objetivo de avaliar a capacidade de manutenção da ligação entre os agregados graúdos e o ligante asfáltico, especialmente após a ação da água. Esse parâmetro é relevante para a durabilidade das misturas asfálticas, pois a perda de aderência entre agregado e ligante pode favorecer processos de desagregação, redução da coesão e queda de desempenho do revestimento ao longo do tempo.

O procedimento seguiu as diretrizes da DNIT 452/2024-ME, que estabelece o método para avaliação da adesividade entre ligantes asfálticos e agregados graúdos. De forma geral, o ensaio envolve o recobrimento dos agregados com ligante asfáltico e a posterior avaliação visual do grau de aderência após a condição de ensaio. A partir desse resultado, torna-se possível verificar se o agregado apresenta adesividade satisfatória ao ligante empregado ou se há necessidade de utilização de aditivos melhoradores de adesividade, visando aumentar a compatibilidade entre os materiais e a durabilidade da mistura asfáltica.

Figura 14 - Ensaio de adesividade ao ligante.



Fonte: Autoral (2024).

3.2.2.2 Caracterização do Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico utilizado no estudo foi o Cimento Asfáltico de Petróleo CAP 50/70, fornecido pela empresa Stratura. Ressalta-se que, no presente trabalho, não foram realizados ensaios laboratoriais específicos de caracterização do ligante asfáltico, como penetração, ponto de amolecimento, viscosidade ou recuperação elástica. As propriedades consideradas para identificação e enquadramento do material foram obtidas a partir do relatório técnico fornecido pela Stratura e elaborado pela REGAP/Betim, sendo utilizadas como referência para a seleção e o emprego do ligante nas misturas asfálticas avaliadas.

A escolha do CAP 50/70 fundamentou-se em sua ampla disponibilidade e no uso consolidado em obras de pavimentação no Brasil. De acordo com dados da ANP, esse tipo de ligante apresentou participação expressiva no mercado nacional, correspondendo a 70,62% do total de CAP comercializado em 2022, o que favorece sua disponibilidade logística e sua aplicação em estudos laboratoriais e obras de pavimentação (ANP, 2023). Quando comparado a outros ligantes asfálticos comerciais brasileiros classificados por penetração, como o CAP 30/45 e o CAP 80/100, o CAP 50/70 ocupa uma faixa intermediária de consistência, apresentando comportamento compatível com misturas asfálticas a quente destinadas a condições usuais de tráfego e serviço.

Do ponto de vista técnico, a faixa de penetração de 50 a 70 décimos de milímetro indica uma condição intermediária entre ligantes mais consistentes, como o CAP 30/45, e ligantes de menor viscosidade, como o CAP 80/100. Essa característica torna o CAP 50/70 uma opção frequentemente empregada em misturas asfálticas, pois permite compatibilizar trabalhabilidade durante a produção e compactação com resistência às solicitações em serviço. No presente estudo, essas informações foram utilizadas como base para caracterizar o ligante empregado nas misturas, sem a realização de ensaios complementares próprios sobre o CAP.

3.2.3 Agente rejuvenescedor

O agente rejuvenescedor é um aditivo empregado para reduzir o enrijecimento do ligante asfáltico envelhecido presente no RAP, buscando recompor parcialmente suas frações mais leves e restabelecer propriedades associadas à trabalhabilidade, capacidade de deformação e adesividade ligante-agregado, afetadas por processos de volatilização e oxidação ao longo do tempo. Em termos de desempenho, há evidências de que, dependendo do produto e da dosagem, rejuvenescedores podem aproximar o comportamento do ligante recuperado daquele observado em ligantes convencionais; por exemplo, Bernucci et al. (2022) relatam que a incorporação de cerca de 20% de determinados rejuvenescedores (como o AR-5) pode recuperar características próximas às de um ligante novo (CAP 50/70) sem comprometer requisitos mecânicos da mistura. Além disso, o mesmo referencial destaca que, de modo geral, avaliações de sustentabilidade e segurança ambiental indicam ausência de riscos ambientais relevantes para diversos desses produtos, desde que utilizados conforme especificações e boas práticas de aplicação (Bernucci et al., 2022).

3.3 Dosagem e Produção das Misturas Asfálticas

O método Superpave, amplamente utilizado em diversos países, apresenta vantagens em relação ao método Marshall por considerar, de forma mais detalhada, as condições de tráfego e clima, além de empregar compactação giratória, que representa de maneira mais realista as solicitações aplicadas ao pavimento. Contudo, devido à indisponibilidade do compactador Superpave no período do estudo, adotou-se o método de dosagem Marshall, desenvolvido por Bruce Marshall (1940), amplamente utilizado no Brasil e normatizado pelo DNIT. O método Marshall permite definir a quantidade ótima de ligante na mistura asfáltica,

atendendo aos parâmetros volumétricos exigidos, como volume de vazios (Vv) e relação betume-vazios (RBV), conforme estabelecido no procedimento DNIT 178/2018-PRO.

Para cada formulação, foram moldados 15 corpos de prova, sendo 3 para cada teor de ligante, com teores variando de 4,5% a 6,5%, visando a determinação do Teor de Ligante de Projeto (TLP). A definição do TLP baseou-se na combinação de Vv e RBV, conforme recomendado por Bernucci et al. (2022). No presente estudo, em vez da abordagem linear sugerida por esses autores, utilizou-se regressão polinomial de terceira ordem para melhor ajuste dos dados experimentais (Mendonça, 2023).

As misturas avaliadas foram:

- RAP + brita de gnaiss;
- RAP + brita de gnaiss + aditivo rejuvenescedor;
- Brita de gnaiss + ligante asfáltico (mistura controle).

Foram formuladas misturas incorporando 30%, 40% e 50% de RAP (em relação à massa total da composição granular), composta por RAP, pó de pedra, brita 0 e brita 1 de gnaiss. Para avaliar a influência do ligante envelhecido presente no RAP, as misturas foram produzidas em duas condições: sem rejuvenescedor e com rejuvenescedor, aplicado na dosagem de 3% da massa do teor de ligante, mantendo-se as mesmas proporções de RAP. Para fins de comparação, também foram preparadas misturas controle constituídas exclusivamente por agregados de gnaiss e ligante asfáltico, sem incorporação de RAP.

Os parâmetros físico-volumétricos determinados para as misturas compactadas incluíram densidade máxima teórica (Gmm/DMT), densidade relativa aparente (Gmb), massa específica aparente (MEa), volume de vazios (Vv), vazios no agregado mineral (VAM), relação betume-vazios (RBV) e absorção de água, conforme indicado por Bernucci et al. (2022) e Balbo (2007). O Vv foi obtido a partir da relação entre Gmb e Gmm, expressando a fração volumétrica de vazios em relação ao volume total da mistura, parâmetro relevante por influenciar resistência mecânica, permeabilidade e durabilidade, evitando situações como exsudação (excesso de ligante) ou fragilidade por insuficiência de compactação. A determinação de Gmb e MEa dos corpos de prova foi realizada conforme a DNIT 428-ME (DNIT, 2022b).

A seguir, são descritas de forma objetiva as etapas adotadas para a dosagem e compactação das misturas asfálticas, conforme referência metodológica apresentada por Mendonça (2023):

1. Preparação dos materiais: Pesar os agregados de forma que, após a adição do ligante, a mistura final tenha aproximadamente 1200 g. A quantidade de agregados é mantida fixa, enquanto a massa total pode variar conforme o teor de ligante.
2. Aquecimento dos materiais: Elevar a temperatura dos agregados e do recipiente de mistura para 160°C, enquanto o ligante asfáltico é aquecido separadamente a 150°C, garantindo que apenas a quantidade necessária para a rodada de compactação seja aquecida.
3. Mistura dos componentes: Adicionar os agregados aquecidos no recipiente de mistura, pesar a quantidade exata de ligante asfáltico correspondente ao teor desejado e misturar os materiais por 3 minutos até obter uma mistura homogênea.
4. Envelhecimento a curto prazo: Transferir a mistura para uma estufa aquecida a 140°C e mantê-la por 2 horas, simulando o envelhecimento precoce do ligante asfáltico devido ao processo de usinagem e aplicação.
5. Preparação dos moldes e equipamentos: Aquecer previamente os moldes cilíndricos, a base e o soquete de compactação para evitar choque térmico e garantir uma moldagem eficiente.
6. Montagem do molde e pré-acomodação da mistura: Posicionar a base e o molde no compactador, inserir um papel filtro sobre a base e despejar rapidamente a mistura asfáltica aquecida. Utilizar uma espátula para distribuir o material uniformemente e aplicar 25 golpes manuais para acomodação inicial.
7. Compactação da amostra: Colocar outro papel filtro sobre a mistura e posicionar o soquete de compactação. Acionar o equipamento e aplicar 75 golpes sobre a amostra.
8. Inversão e segunda compactação: Remover o soquete e o colarinho, inverter o corpo de prova dentro do molde, recolocar os componentes e aplicar mais 75 golpes para completar a compactação.

9. Resfriamento e extração do corpo de prova: Desmontar o conjunto e deixar o molde resfriar à temperatura ambiente, permitindo a estabilização da amostra antes de removê-la.
10. Medição das dimensões: Utilizar um paquímetro para registrar quatro medições do diâmetro e altura do corpo de prova em direções distintas.
11. Determinação da densidade: Realizar as pesagens nas condições seca, submersa em água a 25°C (pesagem hidrostática) e saturada com superfície seca.
12. Ensaio de estabilidade e fluência: Condicionar a amostra em estufa ou banho a 60°C por 2 horas e submetê-la ao teste Marshall, registrando a carga máxima suportada (estabilidade) e o deslocamento ocorrido até a ruptura (fluência).
13. Finalização do processo: Descartar o corpo de prova após o ensaio, calcular os parâmetros volumétricos e mecânicos, organizar os dados em planilhas e determinar o teor de ligante de projeto.
14. Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos: Compactar novos corpos de prova utilizando o teor de ligante de projeto definido, garantindo amostras padronizadas para os testes de resistência e desempenho.

Após a execução dos procedimentos, os parâmetros obtidos devem atender aos limites estabelecidos na DNIT 031/2024-ES para concreto asfáltico, conforme requisitos indicados na Figura 15 (Requisitos para Projeto de Concreto Asfáltico). Essa conformidade assegura que as misturas apresentem resistência mecânica, trabalhabilidade e durabilidade compatíveis com os critérios técnicos aplicáveis à pavimentação rodoviária.

Figura 15 - Requisitos para projeto de concreto asfáltico.

Parâmetros	Norma	Valor
Volume de vazios (%)	DNIT 449 – PRO	3 a 5
Relação betume vazios (%)	DNIT 449 – PRO	65 a 75
Vazios do agregado mineral (%)	DNIT 449 – PRO	Tabela 5
Proporção filler/asfalto (F/A)	DNIT 449 – PRO	0,6 a 1,6
Resistência à tração (MPa)	DNIT 136 – ME	$\geq 0,65$
Dano por umidade induzida (razão)	DNIT 180 – ME	$\geq 0,70$
Estabilidade Marshall (kgf) (75 golpes)	DNIT 447 – ME	≥ 500
CDI	DNIT 426 – IE	Conforme definido em projeto
TDI		
Módulo de resiliência	DNIT 135 – ME	
Parâmetros de fadiga	DNIT 183 – ME	
Flow Number (FN)	DNIT 184 – ME	

Fonte: DNIT 031/2024.

Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas (Ensaio Gmm)

A densidade relativa máxima medida (Gmm) e a massa específica máxima medida (MEMm) das misturas asfálticas não compactadas foram determinadas pelo método Rice, conforme a DNIT 427/2020-ME. Essas grandezas representam a condição máxima teórica da mistura sem vazios de ar e são referências fundamentais para o controle tecnológico e para a dosagem volumétrica de misturas produzidas em laboratório, em usina ou obtidas por extração em campo.

O ensaio, mostrado na Figura 16, permitiu obter os valores posteriormente empregados no cálculo de parâmetros volumétricos, com destaque para o volume de vazios (Vv) e demais índices relacionados à compactação e ao desempenho da mistura.

Figura 16 - Ensaio de Gmm.



Fonte: Autoral (2024).

Após a determinação da massa específica máxima medida (Gmm), os corpos de prova compactados foram submetidos ao ensaio de determinação da massa específica aparente da mistura compactada (Gmb) e da absorção de água, conforme os procedimentos estabelecidos pela DNIT 428/2022 – ME. O ensaio consiste na determinação das massas do corpo de prova nas condições seca ao ar, saturada com superfície seca (SSS) e imersa em água, possibilitando o cálculo da massa específica aparente da mistura compactada e do percentual de absorção de água. A massa específica aparente (Gmb) representa a relação entre a massa seca do corpo de prova e seu volume total, incluindo os vazios presentes na mistura compactada, enquanto a absorção de água fornece uma estimativa da quantidade de vazios permeáveis interligados. Esses parâmetros são fundamentais para a caracterização volumétrica das misturas asfálticas, sendo utilizados, em conjunto com a Gmm, na determinação do volume de vazios (Vv), dos vazios do agregado mineral (VAM) e da relação betume-vazios (RBV), indicadores essenciais para a avaliação da qualidade da dosagem Marshall e do desempenho esperado da mistura em serviço.

3.4 Ensaios Mecânicos das Misturas Asfálticas

A avaliação do desempenho mecânico das misturas foi conduzida por meio de ensaios laboratoriais voltados à verificação de parâmetros de resistência, durabilidade e resposta sob condições representativas de carregamento e ambiente. Estes ensaios permitiram aferir a adequação das misturas aos requisitos normativos aplicáveis e fornecer subsídios técnicos

para a comparação do comportamento das diferentes formulações, considerando o desempenho esperado em pavimentos rodoviários.

3.4.1 Ensaio de estabilidade e fluência Marshall

O ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall, conforme a DNIT 447/2024-ME, é empregado para avaliar a resistência e a deformabilidade de misturas asfálticas, fornecendo parâmetros utilizados tanto na dosagem quanto no controle tecnológico (Figura 17). A Estabilidade Marshall corresponde à carga máxima suportada pelo corpo de prova antes da ruptura, expressa em N ou kgf, enquanto a Fluência Marshall representa a deformação total associada à aplicação dessa carga máxima, usualmente medida em décimos de milímetro.

Para a execução do ensaio, utilizam-se corpos de prova cilíndricos previamente compactados, os quais são condicionados em banho-maria a 60 °C por aproximadamente 30 a 40 min e, em seguida, submetidos a carregamento monotônico em prensa Marshall, com taxa de deformação controlada de 50 ± 5 mm/min, até a ocorrência da ruptura. No conjunto da etapa experimental, foram moldados 150 corpos de prova, empregados na dosagem e na avaliação mecânica das misturas asfálticas, contemplando as diferentes formulações analisadas com incorporação de RAP, com e sem adição de agente rejuvenescedor, além da mistura de referência.

Figura 17 - Ensaio de estabilidade e fluência Marshall.



Fonte: Autoral (2024).

A DNIT 447/2024-ME substitui a antiga DNER-ME 043/95, incorporando atualizações técnicas voltadas a aprimorar a padronização do procedimento e aumentar a

precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos no ensaio de estabilidade e fluência Marshall.

Embora o ensaio Marshall seja amplamente empregado na dosagem e no controle de misturas asfálticas, sua aplicação tem sido gradualmente complementada ou substituída por métodos mais avançados, sobretudo devido às limitações de representação do comportamento em serviço. Em particular, a compactação por impacto não reproduz de forma fidedigna as condições de compactação em campo e as solicitações reais de tráfego, o que pode introduzir variabilidade e restringir a capacidade preditiva do método em termos de desempenho de longo prazo. Além disso, o ensaio não foi concebido para avaliar de modo direto mecanismos essenciais de deterioração, como fadiga e deformação permanente, sendo, portanto, insuficiente para uma caracterização mecanística completa. Ainda assim, considerando as condições de infraestrutura laboratorial disponíveis no período do estudo, adotaram-se os ensaios acessíveis e normatizados, garantindo consistência metodológica e comparabilidade dos resultados.

3.4.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD)

O ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD), ilustrado na Figura 18, foi realizado conforme a DNIT 136/2018-ME, com o objetivo de avaliar a capacidade da mistura asfáltica de resistir aos esforços de tração induzidos. Esse parâmetro é relevante porque a camada de rolamento dos pavimentos flexíveis, ao ser solicitada pelas cargas repetidas do tráfego de veículos, pode desenvolver tensões de tração associadas ao processo de fissuração e à redução da durabilidade do revestimento. O procedimento consiste na aplicação de carga diametral em corpos de prova cilíndricos, gerando tensões de tração no plano vertical do corpo de prova, de forma a representar, de maneira simplificada, o efeito das solicitações impostas pelo tráfego. A norma estabelece, para concretos asfálticos, valor mínimo de 0,65 MPa para a resistência à tração, servindo como critério de aceitação no controle tecnológico (DNIT, 2018).

Procedimento do Ensaio:

1. Preparação dos Corpos de Prova (CPs): Utilizam-se CPs de concreto asfáltico com dimensões de altura e diâmetro conhecidas, moldados conforme a DNIT 178/2018-PRO, que especifica a preparação de corpos de prova utilizando o compactador giratório Superpave ou Marshall.

2. Condicionamento Térmico: Os CPs são aquecidos em estufa a 25 °C por um período de 4 horas, garantindo a uniformidade térmica necessária para o ensaio.
3. Posicionamento para Ensaio: Após o condicionamento, cada CP é colocado em um dispositivo com frisos curvos, posicionados diametralmente opostos, que transmitem a carga aplicada pela prensa. Esse dispositivo assegura o alinhamento adequado do corpo de prova, permitindo que o esforço diametral de compressão aplicado induza deformações por tração até o rompimento.
4. Aplicação da Carga: A carga é aplicada de forma contínua e controlada, com velocidade de deslocamento da base de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, promovendo a aplicação de esforço diametral de compressão sobre o corpo de prova. Esse carregamento induz tensões e deformações de tração no plano diametral até a ruptura do CP. A força máxima registrada no momento da ruptura é anotada para cálculos posteriores.
5. Cálculo da Resistência à Tração: A tensão de ruptura (σ_r) é calculada utilizando a seguinte equação:

$$\sigma_r = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H}$$

Onde:

- F é a força na ruptura (N);
- D é o diâmetro do CP (mm);
- H é a altura do CP (mm).

A conformidade com a DNIT 136/2018-ME assegura que as misturas asfálticas apresentem desempenho adequado em termos de resistência à tração.

Além dessas análises, foram realizadas correlações entre os resultados laboratoriais e parâmetros normativos, permitindo identificar a viabilidade técnica da incorporação de RAP e rejuvenescedores na formulação de misturas asfálticas para pavimentação rodoviária.

Figura 18 - Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.



Fonte: Autoral (2024).

3.5 Análise de custos

A análise de custos foi realizada de forma estimativa e comparativa, com o objetivo de avaliar a influência da incorporação de RAP e do agente rejuvenescedor no custo das misturas asfálticas estudadas. Para isso, foram considerados os teores dos materiais utilizados em cada composição, como agregados virgens, ligante asfáltico, RAP e rejuvenescedor, associados aos respectivos custos de referência adotados no estudo. Os custos do ligante asfáltico tiveram como base valores da ANP de 2020, sendo obtidos, para as composições avaliadas, custos de ligante de R\$ 206,44/t para a mistura de referência, R\$ 156,64/t para 30% RAP e 0% rejuvenescedor, R\$ 142,15/t para 30% RAP e 3% rejuvenescedor, R\$ 130,02/t para 40% RAP e 0% rejuvenescedor, R\$ 123,14/t para 40% RAP e 3% rejuvenescedor, R\$ 111,37/t para 50% RAP e 0% rejuvenescedor e R\$ 102,68/t para 50% RAP e 3% rejuvenescedor. Para os agregados de gnaiss, foram adotados custos de R\$ 102,50/t para a mistura de referência, R\$ 76,44/t para 30% RAP e 0% rejuvenescedor, R\$ 76,76/t para 30% RAP e 3% rejuvenescedor, R\$ 67,96/t para 40% RAP e 0% rejuvenescedor, R\$ 68,09/t para 40% RAP e 3% rejuvenescedor, R\$ 59,29/t para 50% RAP e 0% rejuvenescedor e R\$ 59,44/t para 50% RAP e 3% rejuvenescedor. A partir da soma desses custos parciais, foi estimado o custo total de cada mistura asfáltica, permitindo comparar economicamente as formulações avaliadas. Ressalta-se que essa análise não contemplou custos executivos completos, como impostos, transporte, usinagem, aplicação em campo, mão de obra, equipamentos, despesas indiretas operacionais e

BDI, sendo utilizada apenas como etapa complementar à avaliação volumétrica e mecânica das misturas.

3.6 Determinação da massa unitária de agregados em estado solto

Em complemento às etapas laboratoriais executadas durante a Iniciação Científica, foi realizado o ensaio de determinação da massa unitária de agregados em estado solto, conforme o método DNIT 437/2022 – ME, Figura 19. A norma estabelece o procedimento para determinação da massa unitária e cálculo do volume de vazios de agregados finos, graúdos ou misturas de agregados em estado solto e compactado, incluindo requisitos de aparelhagem, amostragem, procedimento, cálculos e apresentação dos resultados. Embora o método contemple as duas condições, neste trabalho foi dada maior ênfase à massa unitária em estado solto, por sua relação direta com situações práticas de armazenamento, transporte, carregamento e manuseio do material, especialmente no caso do RAP, que após a fresagem tende a se apresentar sem compactação controlada. De acordo com a DNIT 437/2022 – ME, o estado solto corresponde à condição em que os agregados preenchem um recipiente de volume conhecido sem aplicação de esforço de compactação, apenas pela ação da gravidade.

Inicialmente, foram determinadas as dimensões internas do recipiente cilíndrico utilizado no ensaio. Para isso, obteve-se o diâmetro médio do recipiente por meio da média entre as leituras realizadas, conforme a Equação 1:

$$D_{méd} = \frac{D_1 + D_2 + D_3}{3} \quad (1)$$

Em que $D_{méd}$ corresponde ao diâmetro médio interno do recipiente, em cm, e D_1 , D_2 e D_3 correspondem às leituras individuais do diâmetro interno, também em cm. A partir do diâmetro médio, calculou-se o raio interno do recipiente, conforme a Equação 2:

$$r = \frac{D_{méd}}{2} \quad (2)$$

Em que r corresponde ao raio interno do recipiente, em cm. Em seguida, foi determinado o volume interno do cilindro, conforme a Equação 3:

$$V = \pi r^2 H \quad (3)$$

Sendo V correspondente ao volume interno do recipiente, em cm^3 ; r corresponde ao raio interno do recipiente, em cm; e H corresponde à altura interna média do recipiente, em cm. Para utilização no cálculo da massa unitária, o volume foi posteriormente convertido de cm^3 para m^3 .

O ensaio foi executado com amostras na condição seca, buscando evitar a segregação dos agregados durante o manuseio. Para a determinação da massa unitária solta, o recipiente foi inicialmente pesado vazio e seco. Em seguida, foi preenchido com o material até o transbordamento, sem aplicação de energia de compactação, e sua superfície foi nivelada em relação à borda do recipiente. Após esse procedimento, determinou-se a massa do conjunto recipiente mais agregado. A massa efetiva do agregado foi calculada pela Equação 4:

$$m = M_c - M_r \quad (4)$$

Onde m corresponde à massa do agregado no estado solto, em kg; M_c corresponde à massa do recipiente preenchido com o agregado, em kg; e M_r corresponde à massa do recipiente vazio, em kg.

A massa unitária solta foi então obtida pela razão entre a massa do agregado e o volume conhecido do recipiente, conforme a Equação 5:

$$MU_s = \frac{m}{V} \quad (5)$$

Ou, substituindo-se a massa do agregado pela diferença entre a massa do recipiente preenchido e a massa do recipiente vazio:

$$MU_s = \frac{M_c - M_r}{V}$$

Em que MUs corresponde à massa unitária no estado solto, em kg/m^3 ; Mc corresponde à massa do recipiente preenchido com o agregado, em kg; Mr corresponde à massa do recipiente vazio, em kg; e V corresponde ao volume interno do recipiente, em m^3 . O procedimento foi realizado em três repetições para cada material analisado, e a massa unitária média foi determinada conforme a Equação 6:

$$\overline{MUs} = \frac{MUs1 + MUs2 + MUs3}{3} \quad (6)$$

Onde $\overline{MUs}$ corresponde à massa unitária média no estado solto, em kg/m^3 , e $MUs1$, $MUs2$ e $MUs3$ correspondem aos valores obtidos em cada repetição do ensaio. A partir dos valores obtidos, foi possível estabelecer a relação entre massa e volume dos materiais em condição solta, parâmetro utilizado posteriormente na estimativa do quantitativo de RAP gerado em intervenções de fresagem. Dessa forma, o ensaio contribuiu para a caracterização volumétrica dos materiais e para a discussão sobre transporte, estocagem e reaproveitamento do resíduo no contexto da manutenção viária.

Figura 19 - Ensaio de determinação da massa unitária.



Fonte: ANTT (2024).

3.7 Simulação para quantificação volumétrica de resíduos sólidos de fresagem (RAP)

Como etapa complementar à caracterização laboratorial, foi realizada uma simulação para estimar o quantitativo volumétrico, mássico e logístico de RAP gerado por serviços de fresagem de pavimento asfáltico. A simulação teve como base os documentos técnicos do Programa Conserva Pro, especialmente o Termo de Referência e o Projeto Básico/Executivo, nos quais o serviço é indicado como fresagem descontínua de pavimento asfáltico com espessura de 3 cm e área prevista de 80.000 m² por lote. Considerando que esse serviço está previsto em seis lotes, do Lote 1 ao Lote 7, com exceção do Lote 6, adotou-se na simulação a área total correspondente aos seis lotes analisados. Como os documentos consultados não informam a largura específica das vias ou faixas fresadas, a estimativa não foi realizada pela relação entre comprimento e largura da pista, mas sim pela área contratual de fresagem indicada nos documentos técnicos (DER-MG, 2023a; DER-MG, 2023b).

Inicialmente, o volume de camada asfáltica removida foi estimado pela multiplicação entre a área total prevista para fresagem e a espessura da camada removida, conforme a Equação:

$$V = A \cdot e$$

Em que V corresponde ao volume da camada asfáltica removida, em m³; A corresponde à área total de fresagem, em m²; e e corresponde à espessura da camada fresada, em m. Esse volume representa a camada asfáltica ainda em condição compactada no pavimento, antes da desagregação provocada pelo processo de fresagem.

Para a conversão do volume compactado em massa de material fresado, foi utilizada a massa específica aparente da mistura asfáltica compactada, associada ao parâmetro Gmb, e não a massa unitária solta do RAP. Essa escolha se justifica porque o volume obtido pela área de fresagem e pela espessura da camada corresponde ao material existente na pista em estado compactado. Dessa forma, a massa de RAP removida foi estimada por:

$$M = V \cdot \rho_{ap}$$

Em que M corresponde à massa estimada de RAP removido, em kg; e ρ corresponde à massa específica aparente da mistura asfáltica compactada, em kg/m³. Quando o valor de Gmb é expresso em g/cm³, sua conversão para kg/m³ é realizada pela relação:

$$\rho_{ap} = Gmb \cdot 1000$$

Assim, a estimativa mássica do RAP foi conduzida considerando a condição real da camada antes da remoção, evitando a utilização da massa unitária solta para representar um volume originalmente compactado. Neste estudo, o valor de Gmb foi obtido a partir das anotações do ensaio de massa específica aparente da mistura asfáltica compactada, considerando o peso seco, o peso saturado submerso e o peso saturado com superfície seca.

A massa unitária solta do RAP, determinada no tópico anterior, foi utilizada apenas como parâmetro complementar da análise, com a finalidade de estimar o volume ocupado pelo material após a fresagem. Essa distinção é necessária porque a massa do material permanece a mesma antes e depois da fresagem, enquanto o volume se altera em função da desagregação da camada compactada. Para essa etapa, foi utilizada a Equação:

$$V_{solto} = \frac{M}{MUs}$$

Em que V_{solto} corresponde ao volume estimado do RAP em estado solto, em m^3 ; e MUs corresponde à massa unitária solta do RAP, em kg/m^3 . Esse volume foi empregado como referência para estimar a demanda de transporte e armazenamento do material fresado.

Também foi estimado o número de viagens necessárias para transporte do RAP, considerando caminhões com capacidade volumétrica de $10 m^3$:

$$N = \frac{V_{solto}}{C}$$

Em que N corresponde ao número estimado de viagens e C à capacidade volumétrica do caminhão, em m^3 . Quando necessário, o valor obtido foi arredondado para o número inteiro superior, uma vez que o transporte demanda viagens completas.

Por fim, foi realizada uma estimativa da distância média de transporte até o bota-fora com base nos próprios quantitativos apresentados no Projeto Básico/Executivo. O documento informa o item “Transporte da pista até o bota-fora – Material fresado”, com unidade em $m^3 \cdot km$ e quantidade prevista por lote, mas não apresenta a localização do bota-fora, a distância real de percurso, a rota de transporte ou as condições ambientais da área de destinação. Dessa forma, a distância média de transporte foi inferida pela razão entre o quantitativo total de transporte, em $m^3 \cdot km$, e o volume compactado removido da pista:

$$DMT = \frac{T}{V}$$

Em que DMT corresponde à distância média de transporte, em km; e T corresponde ao quantitativo de transporte previsto, em m³·km. A partir dessa distância, também foi estimado o momento operacional de transporte considerando o volume do RAP em estado solto:

$$T_{solto} = V_{solto} \cdot DMT$$

Dessa forma, a metodologia adotada permitiu diferenciar três condições distintas: o volume da camada compactada removida na pista, a massa efetiva de RAP gerada e o volume operacional do material em estado solto para transporte e armazenamento. Essa distinção é importante para relacionar a execução dos serviços de fresagem às demandas de planejamento, logística e gestão de resíduos sólidos, especialmente quanto ao reaproveitamento do RAP, à redução da destinação em bota-fora e à avaliação de alternativas mais adequadas para reinserção do material no sistema viário.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais foram organizados e analisados com base nos critérios técnicos aplicáveis à caracterização de materiais e à avaliação de misturas asfálticas, considerando as especificações de serviço e métodos de ensaio adotados pelo DNIT e demais referências normativas pertinentes. As análises contemplaram, inicialmente, os dados provenientes da etapa de Iniciação Científica, incluindo a caracterização dos agregados minerais de gnaiss, do Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP), do ligante asfáltico e das misturas produzidas com diferentes teores de material fresado, com e sem adição de agente rejuvenescedor. Os resultados foram sistematizados em planilhas eletrônicas no software Excel, com o apoio do coorientador Whilison Marques Mendonça, utilizando tabelas de cálculo fornecidas pelo próprio coorientador e pelo Núcleo de Geotecnia da UFOP, o que permitiu organizar os parâmetros físicos, volumétricos e mecânicos necessários à interpretação do desempenho das misturas.

Além dos resultados já obtidos durante a Iniciação Científica, esta etapa do PFC incorporou análises complementares voltadas à ampliação da discussão técnica e aplicada do trabalho. Entre elas, destaca-se o ensaio de determinação da massa unitária agregados em

estado solto, realizado conforme a DNIT 437/2022 – ME, cujo objetivo foi obter um parâmetro representativo da condição de acomodação do material sem compactação, especialmente relevante para situações de estocagem, transporte e manuseio. Esse resultado foi utilizado como base para a simulação de quantificação volumétrica e mássica do RAP gerado por fresagem em intervenções de manutenção viária, permitindo relacionar os dados laboratoriais à gestão prática do resíduo. Dessa forma, a discussão dos resultados não se restringiu ao desempenho mecânico das misturas asfálticas, mas também incorporou uma abordagem aplicada ao planejamento urbano, à logística de reaproveitamento e à redução de passivos associados à destinação do material fresado.

4.1. Caracterização dos agregados virgens

A caracterização dos agregados virgens é essencial para verificar a qualidade e a adequação do gnaiss utilizado nas misturas asfálticas. Propriedades como granulometria, massa específica, absorção, equivalente de areia, índice de forma e resistência mecânica influenciam diretamente a trabalhabilidade, a estabilidade e a durabilidade do revestimento, servindo como base para a dosagem e para a análise do desempenho das misturas. Os resultados da caracterização estão indicados abaixo na Tabela 1.

Tabela 1 - Ensaios de caracterização.

Ensaios Realizados	Normas	Resultados
Análise Granulométrica Brita 1 gnaiss (10kg)	DNIT 412 /2019	-
Análise Granulométrica Brita 0 gnaiss (5kg)	DNIT 412 /2019	-
Análise Granulométrica Brita Pó de Pedra (2kg)	DNIT 412 /2019	-
Separação do gnaiss britado na série de peneiras	-	-
Abrasão Los Angeles (2,5 KG 19 A 12,5 E 2,5 KG 12,5 A 9,5)	DNER-ME 035	Desgaste: 32,92 %
Massa específica real, aparente e absorção da Brita 1	DNIT 413 – ME	Massa específica real: 2,604 g/cm ³ Massa específica aparente: 2,578 g/cm ³ Porcentagem de absorção: 0,395 %
Massa específica real, aparente e absorção da Brita 0	DNIT 413 – ME	Massa específica real: 2,619 g/cm ³ Massa específica aparente: 2,584 g/cm ³ Porcentagem de absorção: 0,514 %
Massa específica real, aparente e absorção do PP	DNIT 411 – ME	Massa específica real: 2,670 g/cm ³ Massa específica aparente: 2,595 g/cm ³ Porcentagem de absorção: 1,077%
Equivalente de Areia do PP	DNER-ME 054	Equivalente de areia: 91 %
Índice de forma paquímetro (Gnaiss Brita 0)	DNIT ME 425/2020	Forma Cúbica Índice de Forma: 2,46
Índice de forma paquímetro (Gnaiss Brita 1)	DNIT ME 425/2020	Forma Cúbica Índice de Forma: 2,52
Índice de forma crivo (Gnaiss Brita 0)	DNIT ME 424/2020	Graduação: B, C e D Índice de forma: 0,59
Índice de forma crivo (Gnaiss Brita 1)	DNIT ME 424/2020	Graduação: B, C e D Índice de forma: 0,73
Índice de forma crivo (Pó de Pedra)	DNIT ME 424/2020	Graduação: B, C e D

Índice de forma: 0,39		
Determinação da perda ao choque no aparelho Treton	DNER-ME 399/99	T = 61,27 %

4.1.1. Interpretação dos resultados

Resultado da Análise Granulométrica

A curva granulométrica obtida, Figuras 20, 21 e 22, representa a distribuição do tamanho das partículas dos agregados analisados, indicando a porcentagem acumulada de material passante em uma série de peneiras com aberturas padronizadas. No eixo horizontal, são apresentados os diâmetros das partículas, geralmente em escala logarítmica e expressos em milímetros, enquanto no eixo vertical é indicada a porcentagem acumulada passante, ou seja, a fração de partículas com dimensão inferior ou igual à abertura de cada peneira. Essa representação permite avaliar o enquadramento do material na faixa granulométrica adotada, bem como verificar sua adequação para a composição da mistura asfáltica.

Figura 20 - Curva granulométrica do Pó de pedra.

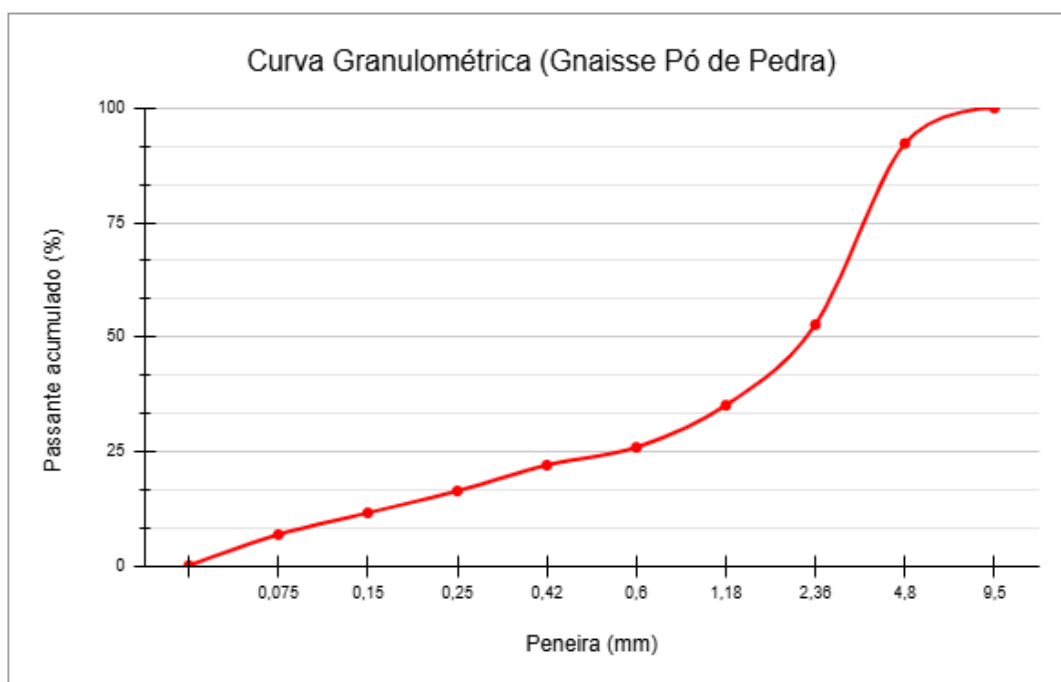


Figura 21 - Curva granulométrica da Brita 0.

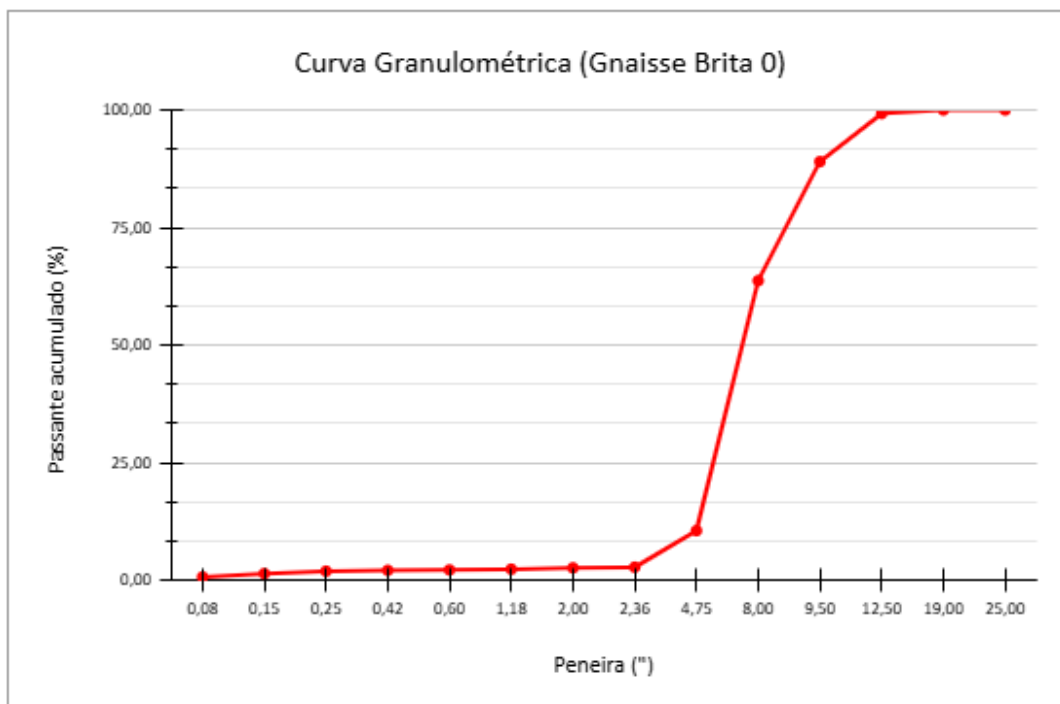
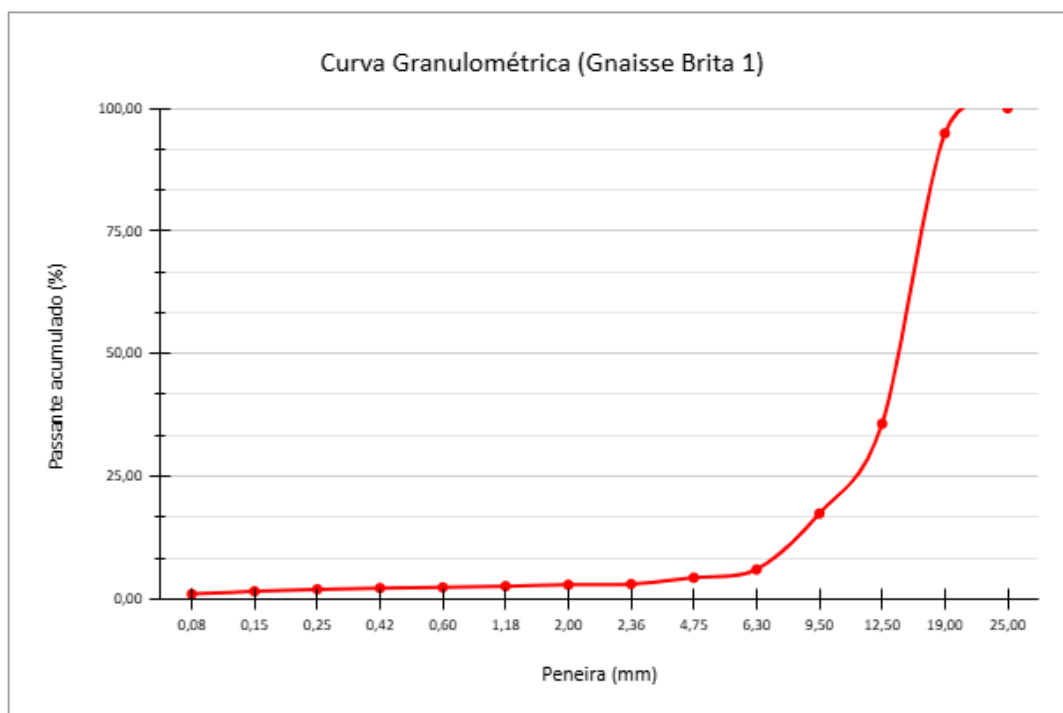


Figura 22 - Curva granulométrica da Brita 1.



De acordo com a norma DNIT 451/2024-ME, o ensaio de abrasão Los Angeles avalia a resistência dos agregados graúdos à degradação por abrasão e impacto, sendo o desgaste expresso pela porcentagem de material passante na peneira de 1,7 mm após a realização do ensaio. No presente estudo, o agregado de gnaiss apresentou desgaste de 32,92%, valor obtido a partir de uma amostra composta por 2,5 kg de material com diâmetro entre 19,0 mm e 12,5 mm e 2,5 kg de material com diâmetro entre 12,5 mm e 9,5 mm. Considerando que os limites de aceitação para a abrasão Los Angeles dependem do tipo de aplicação do agregado e das exigências do órgão rodoviário, Bernucci et al. (2022) indicam que as especificações brasileiras para agregados empregados em camadas de base e revestimento asfáltico normalmente limitam o valor máximo de abrasão Los Angeles entre 40% e 55%. De forma complementar, a especificação técnica do DER/SP para concreto asfáltico estabelece, para agregado graúdo, desgaste Los Angeles igual ou inferior a 50% (DER/SP, 2024). Dessa forma, o valor obtido para o gnaiss, correspondente a 32,92%, encontra-se abaixo desses limites de referência, indicando boa resistência ao desgaste e comportamento compatível com aplicações em misturas asfálticas.

Ensaio de massa específica real, aparente e absorção

Os ensaios de massa específica real, massa específica aparente e absorção foram realizados com o objetivo de caracterizar fisicamente os agregados utilizados na composição das misturas asfálticas. De acordo com Bernucci et al. (2022), no estudo de agregados para pavimentação são consideradas diferentes designações de massa específica, como a real, a aparente e a efetiva, cada uma associada à forma como o volume das partículas e dos poros é considerado. Como referência tecnológica para rochas utilizadas como agregados, os autores indicam que valores de massa específica aparente seca entre 2,6 g/cm³ e 2,9 g/cm³ estão associados a materiais classificados como de boa qualidade, enquanto valores entre 2,5 g/cm³ e 2,6 g/cm³ são enquadrados como qualidade marginal e valores superiores a 2,9 g/cm³ como excelentes. Assim, a interpretação dos resultados deve considerar a composição mineralógica, a densidade das partículas e a porosidade do material.

A massa específica aparente, por considerar o volume aparente das partículas, incluindo os poros permeáveis, tende a apresentar valores inferiores aos da massa específica real. Agregados com maior massa específica aparente e menor absorção indicam estrutura menos porosa, característica desejável para misturas asfálticas, uma vez que reduz a suscetibilidade à entrada de água e contribui para melhor durabilidade. Por outro lado,

agregados com maior porosidade podem apresentar absorção mais elevada, o que pode interferir no teor efetivo de ligante e comprometer o desempenho da mistura.

As porcentagens de absorção obtidas para a Brita 1, Brita 0 e pó de pedra permaneceram inferiores ao limite máximo de 2% adotado pela especificação técnica do DER/SP, determinado conforme DNIT 413-ME, indicando baixa porosidade e qualidade adequada dos agregados analisados. Esse resultado é relevante para a pavimentação asfáltica, pois agregados com absorção elevada podem demandar maior controle do teor de ligante e apresentar maior suscetibilidade à ação da umidade, afetando a adesividade e a durabilidade da mistura.

Ensaio de Equivalente de Areia do Pó de Pedra

O pó de pedra apresentou valor de equivalente de areia de 91%, resultado superior ao limite mínimo de 55%, estabelecido pela norma DNIT 450-ME, para agregados miúdos empregados em misturas asfálticas, conforme o critério normativo adotado para avaliação desse parâmetro. Esse desempenho indica baixa presença de finos plásticos, como siltes e argilas, o que é favorável à qualidade do agregado, pois reduz a possibilidade de interferência negativa na adesividade entre agregado e ligante asfáltico.

Dessa forma, o resultado obtido demonstra que o pó de pedra apresenta condição adequada de limpeza e qualidade para compor as misturas asfálticas analisadas. Esse comportamento contribui para a estabilidade, a coesão e a durabilidade do revestimento, uma vez que materiais com menor presença de finos argilosos tendem a apresentar melhor interação com o ligante asfáltico e menor suscetibilidade à perda de desempenho ao longo da vida útil da mistura.

Ensaio de Índice de Forma (paquímetro e crivo)

A partir dos resultados apresentados na Tabela 2, observa-se que a Brita 0 e a Brita 1 apresentaram classificação cúbica pelo método do paquímetro, com índices de forma iguais a 2,46 e 2,52, respectivamente. Esses valores indicam geometria adequada para aplicação em misturas asfálticas, uma vez que partículas mais cúbicas favorecem o intertravamento granular, a compactação e a estabilidade mecânica do revestimento.

Apesar da classificação favorável, os resultados mostram a presença de partículas não cúbicas em proporções semelhantes para os dois materiais, sendo 37,50% para a Brita 0 e 37,20% para a Brita 1. A porcentagem de partículas achatadas e alongadas foi de 5,50% para a Brita 0 e 4,01% para a Brita 1, indicando que a Brita 1 apresentou condição ligeiramente mais favorável quanto à forma das partículas. Essa menor presença de partículas lamelares ou alongadas tende a reduzir problemas relacionados à quebra dos grãos, à dificuldade de compactação e ao menor desempenho mecânico da mistura.

No ensaio com crivo, a Brita 1 também apresentou o melhor resultado, com índice de forma igual a 0,73, enquanto a Brita 0 apresentou valor de 0,59. Essa diferença confirma que a Brita 1 possui partículas com formato mais adequado, contribuindo de forma mais eficiente para a formação do esqueleto granular da mistura asfáltica. Já o valor obtido para a Brita 0 indica maior tendência à presença de partículas alongadas ou lamelares, embora sua classificação pelo paquímetro ainda tenha sido cúbica.

O pó de pedra apresentou índice de forma com crivo igual a 0,39, o menor entre os materiais avaliados. Esse resultado indica forma menos favorável em comparação às britas, sugerindo maior presença de partículas lamelares ou alongadas. Como esse material não foi avaliado pelo método do paquímetro, sua interpretação deve ser associada aos demais ensaios de caracterização, especialmente granulometria e equivalente de areia.

Tabela 2 - Índice de forma (paquímetro e crivo).

Material	Índice de forma com crivo	Índice de forma com paquímetro	Forma das partículas	Porcentagem não-cúbicas (%)	Porcentagem achatada alongada (%)
Pó de Pedra	0,39	-	-	-	-
Brita 0	0,59	2,46	Cúbica	37,50	5,50
Brita 1	0,73	2,52	Cúbica	37,20	4,01

Ensaio da determinação da perda ao choque no aparelho Treton

O ensaio de perda ao choque no aparelho Treton indicou valor médio de 61,27%, com desvio padrão de aproximadamente 3,50%, considerando as três determinações realizadas. Esse resultado demonstra que o agregado apresentou perda ao impacto ligeiramente superior ao valor de referência de 60%, usualmente adotado como limite para aceitação do material em aplicações de pavimentação, conforme indicado por Viana (2018).

Apesar disso, a interpretação do resultado deve ser realizada de forma integrada aos demais ensaios de caracterização mecânica do agregado. Nesse sentido, embora o resultado médio do Treton indique uma tendência à maior fragmentação sob impacto, o agregado apresentou desempenho adequado no ensaio de Abrasão Los Angeles, com perda de 32,92%, valor inferior aos limites usualmente adotados para agregados empregados em pavimentação asfáltica. Assim, considerando o conjunto dos resultados, o material demonstrou comportamento compatível com aplicação em misturas asfálticas, ainda que o resultado do Treton indique a necessidade de atenção quanto à sua resistência ao impacto.

Ensaio de adesividade ao ligante asfáltico

O ensaio de adesividade indicou que o agregado não apresentou comportamento totalmente satisfatório quando avaliado apenas com o ligante asfáltico, observando-se tendência ao descolamento parcial da película de ligante da superfície do agregado. Esse resultado é relevante porque a baixa adesividade entre agregado e ligante pode aumentar a suscetibilidade da mistura à ação da água, favorecendo a perda de aderência, a desagregação do revestimento e a redução da durabilidade da camada asfáltica (Bernucci et al., 2022).

Entretanto, o resultado apresentou melhora quando foi adicionado o agente rejuvenescedor, conforme ilustrado na Figura 23. Essa melhora indica que o aditivo contribuiu para uma interação mais eficiente entre o ligante e a superfície do agregado, favorecendo o recobrimento e reduzindo a tendência de desprendimento da película asfáltica. Dessa forma, embora o agregado demande atenção quanto à adesividade, especialmente em condições de umidade, o comportamento observado com a adição do rejuvenescedor sugere maior compatibilidade ligante–agregado e melhor potencial de desempenho das misturas avaliadas.

Figura 23 - Ensaio de adesividade.



Fonte: Acervo pessoal (2024).

4.2. Dosagem e resistência das misturas asfálticas

Os resultados foram analisados com base nos Teores de Ligante Ótimo (TLO), também denominados Teores de Ligante de Projeto (TLP), definidos a partir dos parâmetros obtidos nos ensaios de dosagem das misturas asfálticas. Para essa etapa, foram avaliadas composições contendo 30%, 40% e 50% de RAP, produzidas com e sem adição de agente rejuvenescedor, além das misturas de referência compostas por agregado mineral de gnaiss e ligante asfáltico, sem incorporação de RAP. A partir dos valores obtidos para os 15 corpos de prova moldados na etapa de dosagem, os dados foram organizados em planilhas eletrônicas no software Excel, possibilitando a geração de gráficos estatísticos e a definição dos parâmetros correspondentes aos corpos de prova produzidos no teor de ligante ótimo, conforme apresentado na Figura 24. De forma complementar, as Tabelas 3 e 4 ilustram os resultados obtidos a partir da produção das misturas asfálticas, reunindo os principais dados utilizados para a avaliação e comparação das formulações estudadas.

Figura 24 - Parâmetros da Dosagem 40% de RAP com 0% de Rejuvenescedor.

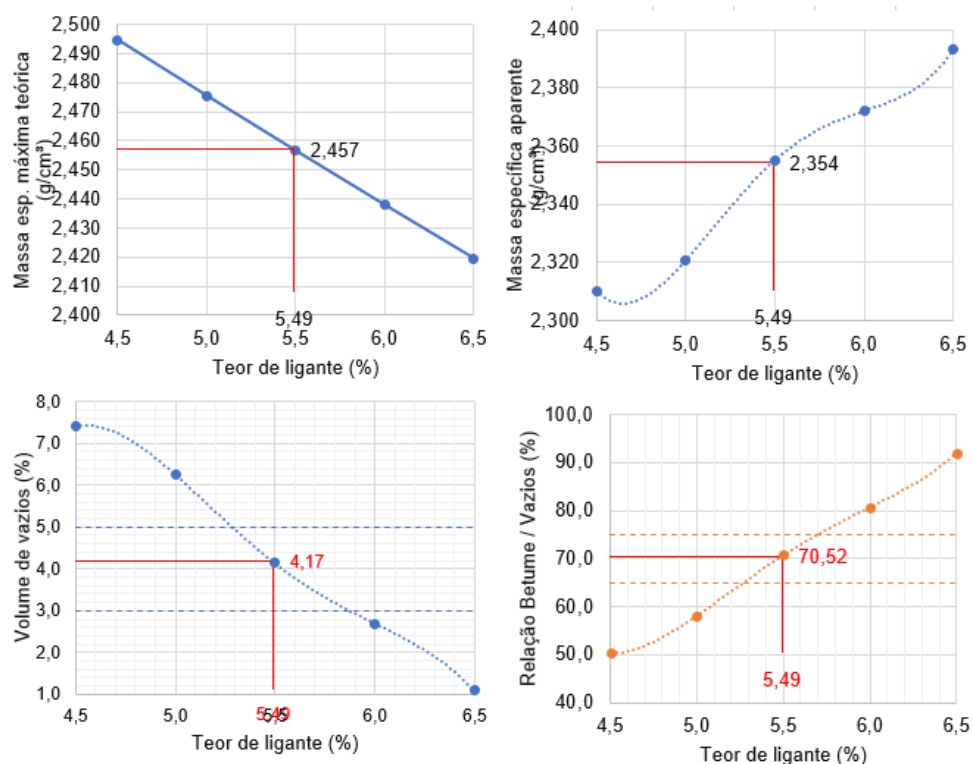


Tabela 3 - Resultados obtidos a partir da produção das misturas asfálticas.

Mistura	Teor de ligante ótimo (%)	Densidade relativa (Gmb)	Água Absorvida (%)	MEa a 25°C (g/cm³)	Vv (%)	RTCD média (MPa)	Relação betume/vazios (%)
30% de RAP e 0% rejuven.	5,75	2,37	0,291	2,363	4,38	1,38	70,58
30% de RAP e 3% rejuven.	5,35	2,321	0,352	2,314	4,24	0,56	69,94
40% de RAP e 0% rejuven.	5,49	2,376	0,366	2,369	4,17	1,41	70,52

40% de RAP e 3% rejuven.	5,3	2,398	0,204	2,391	4,37	1,06	69,01
50% de RAP e 0% rejuven.	5,45	2,403	0,172	2,396	4,1	1,41	69,02
50% de RAP e 3% rejuven.	5,21	2,412	0,148	2,405	4,18	0,99	69,38
0% de RAP e 0% rejuven.	5,7	2,26	0,866	2,254	3,99	0,89	71,38

Tabela 4 - Resultados obtidos a partir da produção das misturas asfálticas.

Mistura	Massa esp. Máx. teórica (g/cm³)	Massa esp. Aparente (g/cm³)	Pbe	Vazios do agregado mineral (%)	Relação Filler/Asfal to	Estab. Marshall corrigida (N)	Fluência (mm)
30% de RAP e 0% rejuven.	2,448	2,341	4,613	14,87	1,27	10849	2,93
30% de RAP e 3% rejuven.	2,463	2,359	4,208	14,01	1,4	6481	2,6
40% de RAP e 0% rejuven.	2,457	2,354	4,37	14,15	1,51	10427	2,2
40% de RAP e	2,464	2,356	4,177	14,05	1,58	8236	1,44

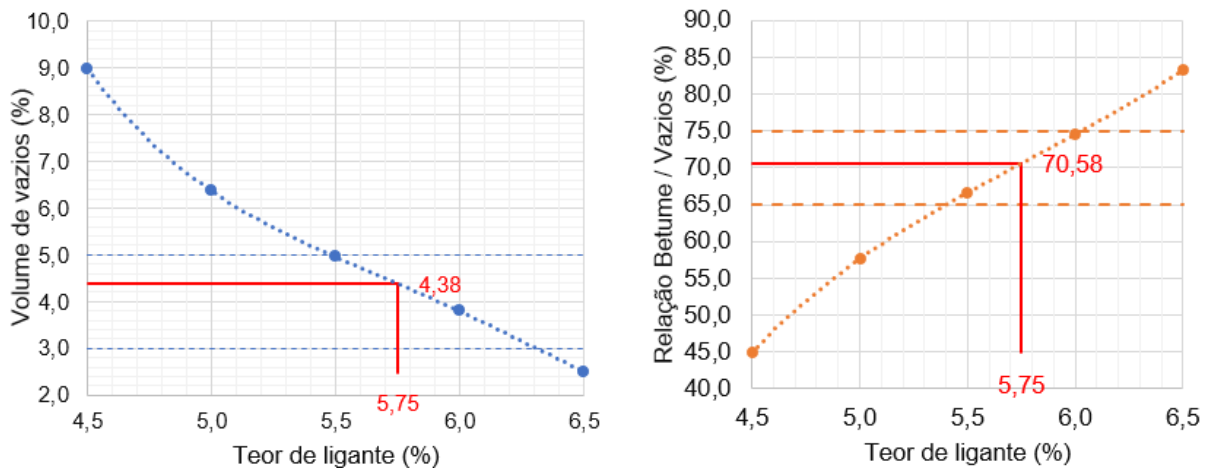
3% rejuven.							
50% de RAP e 0% rejuven.	2,459	2,39	4,333	14,1	1,68	12205	2,02
50% de RAP e 3% rejuven.	2,468	2,364	4,09	13,69	1,78	8299	3,73
0% de RAP e 0% rejuven.	2,449	2,351	4,566	14,41	0,82	9998	4,1

4.2.1. Interpretação dos resultados

Volume de Vazios (Vv), Relação Betume-Vazios (RBV) e Vazios do Agregado Mineral (VAM)

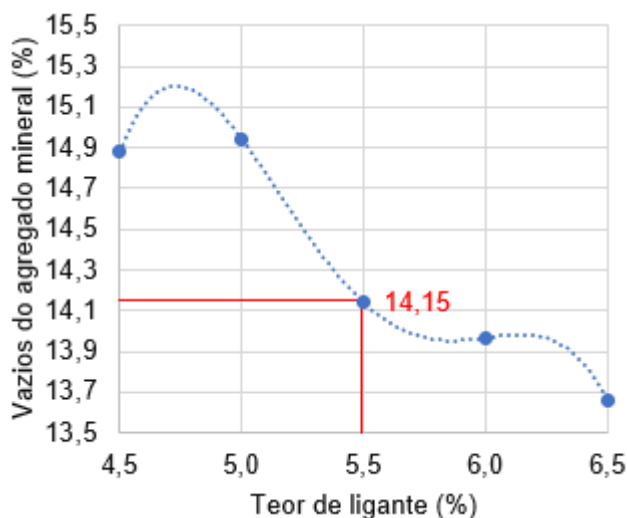
De acordo com a DNIT 031/2024, o volume de vazios (Vv) deve situar-se entre 3% e 5%, enquanto a relação betume-vazios (RBV) deve variar entre 65% e 75%, de modo a garantir equilíbrio entre resistência mecânica, durabilidade e desempenho da mistura asfáltica. As misturas analisadas apresentaram valores de Vv dentro da faixa normativa, variando entre 4,1% e 4,38%, o que indica uma estrutura interna de vazios adequada, capaz de reduzir a possibilidade de exsudação, associada ao excesso de ligante na superfície do pavimento, e, ao mesmo tempo, preservar condições satisfatórias de compactação e flexibilidade. Um exemplo desse comportamento é apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Volume de Vazios e relação betume-vazios da mistura com 30% de RAP e 0% de rejuvenescedor.



Os Vazios do Agregado Mineral (VAM) constituem um parâmetro volumétrico essencial para avaliar a estrutura interna da mistura asfáltica, pois indicam o volume de vazios disponível entre as partículas do agregado, incluindo o espaço ocupado pelo ligante efetivo e pelos vazios de ar. Conforme a DNIT 031/2024, esses valores devem atender aos limites mínimos estabelecidos em função da faixa granulométrica e do volume de vazios da mistura. Nesse contexto, observou-se que a mistura com 50% de RAP e 3% de rejuvenescedor apresentou VAM de 13,69%, valor inferior ao mínimo exigido de 14% para misturas com Vv de 4%. Embora o volume de vazios dessa composição tenha permanecido dentro da faixa normativa, o menor valor de VAM indica uma estrutura granular mais fechada, com menor espaço disponível para acomodação adequada do ligante efetivo, o que pode influenciar a durabilidade e a resistência da mistura sob solicitações repetidas. De modo geral, os valores de VAM variaram entre 13,69% e 14,87%, sendo observado que as misturas com maiores teores de RAP apresentaram tendência de redução desse parâmetro, conforme demonstrado na Figura 26. Esse comportamento sugere maior densificação da estrutura mineral, o que pode contribuir para menor permeabilidade, mas também exige atenção quanto ao risco de redução da durabilidade e possível ocorrência de exsudação ou deformações permanentes em condições severas de tráfego.

Figura 26 - Vazios do Agregado Mineral da mistura com 40% de RAP e 0% de rejuvenecedor.



Relação Filler/Asfalto

A relação Filler/Asfalto foi avaliada com o objetivo de verificar o equilíbrio entre a fração fina da mistura e o teor de ligante asfáltico empregado. Esse parâmetro é relevante porque influencia diretamente a consistência do mástique asfáltico, a trabalhabilidade, a estabilidade e a durabilidade da mistura. De acordo com a DNIT 447/2024-ME, a relação Filler/Asfalto deve permanecer na faixa de 0,6 a 1,6, de modo a garantir proporção adequada entre o material passante na peneira nº 200 e o ligante asfáltico.

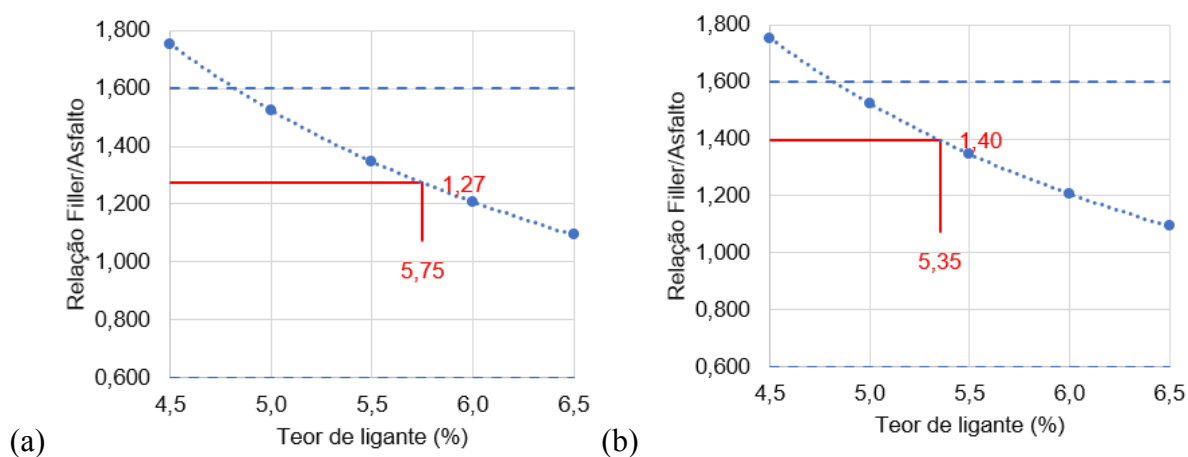
Os resultados indicaram aumento progressivo da relação Filler/Asfalto com a elevação do teor de RAP nas misturas. Esse comportamento está associado à granulometria do material fresado, que tende a apresentar maior porcentual de finos, provavelmente em função dos processos de fresagem, fragmentação e desagregação do revestimento asfáltico antigo. Dessa forma, quanto maior a incorporação de RAP, maior tende a ser a contribuição de partículas finas na composição granulométrica da mistura, refletindo diretamente no aumento da relação Filler/Asfalto, conforme apresentado na Figura 27.

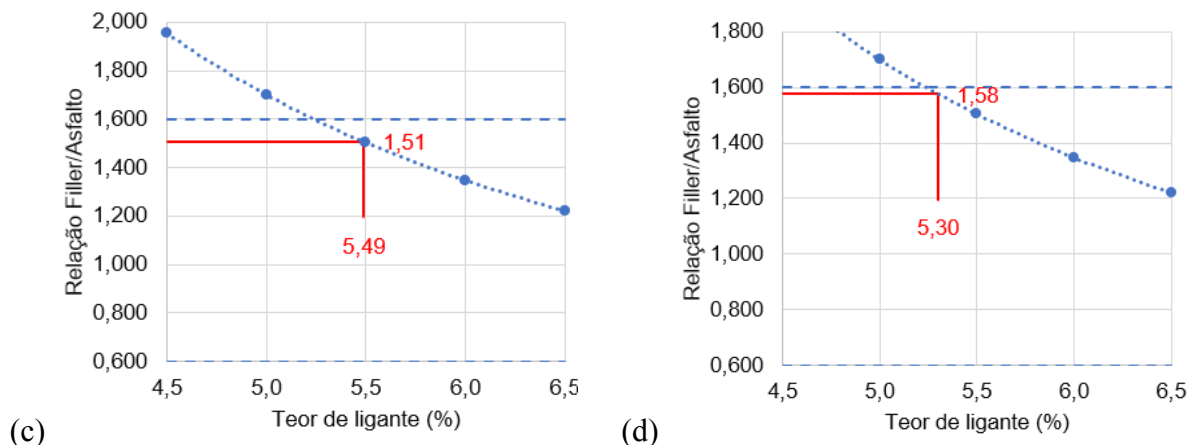
As misturas com 30% de RAP, com e sem rejuvenecedor, apresentaram relações Filler/Asfalto de 1,27 e 1,40, respectivamente, permanecendo dentro da faixa especificada. O mesmo ocorreu para as misturas com 40% de RAP, que apresentaram valores de 1,51 para a mistura sem rejuvenecedor e 1,58 para a mistura com 3% de rejuvenecedor, também dentro do limite máximo estabelecido pela norma, embora já próximas ao valor superior permitido.

Por outro lado, as misturas com 50% de RAP apresentaram valores superiores ao limite normativo, sendo 1,68 para a mistura sem rejuvenescedor e 1,78 para a mistura com 3% de rejuvenescedor. Esses resultados indicam excesso relativo de material fino em relação ao teor de ligante, o que pode tornar o mástique mais rígido, reduzir a trabalhabilidade e interferir no desempenho da mistura. Assim, embora o aumento do teor de RAP contribua para maior reaproveitamento do material fresado, os resultados demonstram a necessidade de controle granulométrico e ajustes de dosagem quando são utilizados teores mais elevados de RAP.

De modo geral, a análise da relação Filler/Asfalto evidenciou que as misturas com 30% e 40% de RAP atenderam aos limites estabelecidos, enquanto as composições com 50% de RAP ultrapassaram a faixa recomendada. Esse comportamento reforça que o uso de RAP deve ser acompanhado de controle tecnológico criterioso, especialmente quanto à fração fina do material fresado, para garantir equilíbrio entre sustentabilidade, reaproveitamento de resíduos e desempenho técnico da mistura asfáltica.

Figura 27 - Relação Filler/Asfalto (a) Mistura com 30% de RAP e 0% de rejuvenescedor; (b) Mistura com 30% de RAP e 3% de rejuvenescedor; (c) Mistura com 40% de RAP e 0% de rejuvenescedor; (d) Mistura com 40% de RAP e 3% de rejuvenescedor.



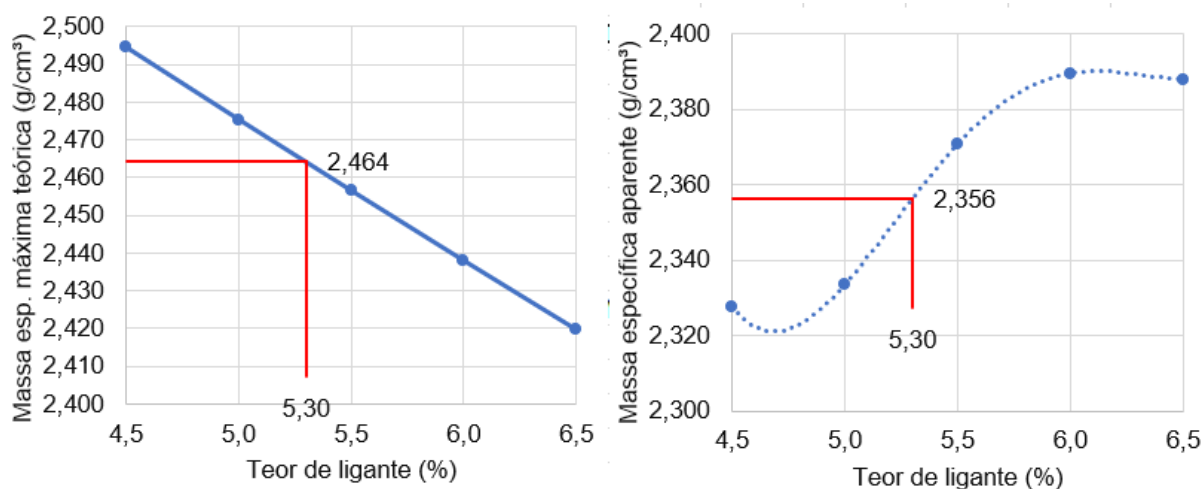


Massa Específica Máxima Teórica (MMT) e Massa Específica Aparente (MEA)

Os resultados de MMT, Figura 28, indicaram pequenas variações entre as misturas avaliadas, associadas às diferenças de composição, ao teor de RAP, à presença ou ausência de rejuvenescedor e às características dos materiais constituintes. As maiores MMT foram observadas nas misturas com 30% de RAP e 3% de rejuvenescedor, com valor de 2,463 g/cm³, e com 40% de RAP e 3% de rejuvenescedor, com valor de 2,464 g/cm³. Entretanto, esses valores não devem ser interpretados isoladamente como indicativo de melhor desempenho, uma vez que maiores valores de MMT representam apenas uma condição teórica de densidade máxima da mistura, não garantindo, por si só, melhor comportamento mecânico ou maior durabilidade.

A MEA, por sua vez, permite avaliar a condição efetiva dos corpos de prova após a compactação, refletindo o arranjo dos agregados, a distribuição do ligante e a presença de vazios na mistura. Dessa forma, a comparação entre MMT e MEA é importante para compreender o grau de compactação e a estrutura volumétrica das misturas, mas sua interpretação deve ser realizada em conjunto com os demais parâmetros de dosagem e desempenho. Misturas com valores semelhantes de MMT podem apresentar comportamentos diferentes em função do volume de vazios, da granulometria, da relação Filler/Asfalto, da rigidez do ligante envelhecido presente no RAP e da eficiência da compactação.

Figura 28 - Relação entre massas específicas e teor de ligante da mistura com 40% de RAP e 3% de rejuvenescedor.



Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD)

A Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) foi avaliada conforme a DNIT 136/2018-ME, considerando como referência o valor mínimo de 0,65 MPa para concretos asfálticos, de modo a verificar a capacidade das misturas de resistirem aos esforços de tração e à formação de fissuras. Nesse contexto, a mistura com 30% de RAP e 3% de rejuvenescedor apresentou o menor valor de RTCD, correspondente a 0,56 MPa, ficando abaixo do limite mínimo adotado. Esse resultado indica menor resistência à tração e possível aumento da suscetibilidade à fissuração, especialmente em condições de tráfego intenso ou variações térmicas significativas.

Em contrapartida, as misturas com 40% de RAP sem rejuvenescedor e 50% de RAP sem rejuvenescedor apresentaram os melhores desempenhos, ambas com RTCD de 1,41 MPa. Esse valor é superior ao dobro do mínimo de referência, indicando elevada resistência mecânica e menor propensão à fissuração. O desempenho dessas misturas sugere que a incorporação de maiores teores de RAP, sem adição de rejuvenescedor, contribuiu para o aumento da rigidez e da resistência à tração da matriz asfáltica.

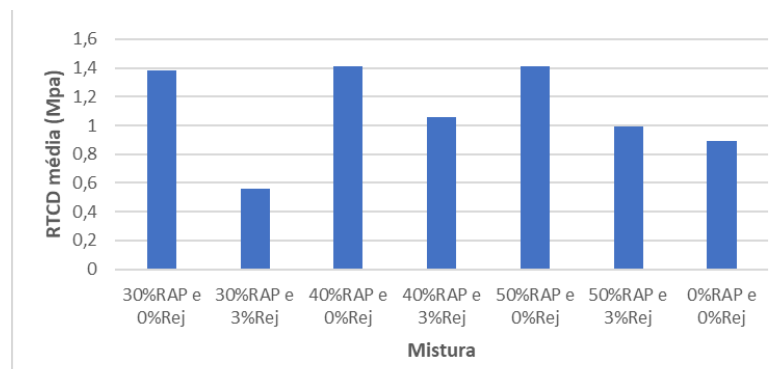
A mistura com 30% de RAP sem rejuvenescedor também apresentou desempenho satisfatório, com RTCD de 1,38 MPa, valor muito próximo ao obtido nas misturas com 40% e 50% de RAP sem aditivo. No entanto, quando o rejuvenescedor foi incorporado à mistura

com 30% de RAP, observou-se redução significativa da resistência, atingindo 0,56 MPa. Esse comportamento pode estar associado ao efeito amolecedor do aditivo, que, nessa dosagem, pode ter reduzido a rigidez da mistura e comprometido sua capacidade de resistir às tensões de tração.

A mistura de referência, composta por 0% de RAP e 0% de rejuvenescedor, apresentou RTCD de 1,08 MPa, valor superior ao mínimo exigido e compatível com o desempenho esperado para uma mistura convencional produzida com agregados virgens e ligante asfáltico. Entretanto, ao compará-la com as misturas contendo RAP sem rejuvenescedor, observa-se que estas apresentaram resistências à tração superiores, reforçando a viabilidade técnica da incorporação do material fresado em misturas asfálticas. A Figura 29 apresenta o gráfico com os resultados obtidos no ensaio de RTCD.

Dessa forma, os resultados indicam que o uso de RAP sem rejuvenescedor, nas proporções avaliadas, manteve ou elevou a resistência mecânica das misturas, possivelmente devido à presença do ligante envelhecido e oxidado do material fresado, que tende a aumentar a rigidez global da mistura. Esse comportamento é compatível com Oliveira et al. (2022), que associam a incorporação de RAP ao aumento da rigidez e da resistência à tração das misturas recicladas. Por outro lado, a adição do rejuvenescedor pode ter reduzido a RTCD em algumas composições devido ao amolecimento do ligante envelhecido, reduzindo a viscosidade, a rigidez e, em certas condições, a coesão do mástique asfáltico. Pradhan e Sahoo (2022) também observaram redução da resistência à tração indireta com a adição de rejuvenescedor, enquanto Behnood (2019) destaca que esse efeito depende do tipo e teor do rejuvenescedor, das características do ligante envelhecido e do método de incorporação.

Figura 29 - Resistência à tração por compressão diametral das misturas estudadas.



Teor de ligante ótimo e densidade relativa

O Teor de Ligante Ótimo (TLO) exerce influência direta sobre a trabalhabilidade, a aderência, a durabilidade e o desempenho mecânico das misturas asfálticas. Observou-se que as misturas com 3% de rejuvenescedor demandaram menores teores de ligante para atingir os parâmetros volumétricos estabelecidos, o que pode representar uma redução no consumo de ligante asfáltico e, conseqüentemente, nos custos de produção. Entretanto, essa redução também deve ser analisada com cautela, uma vez que pode influenciar a resistência mecânica e a rigidez da mistura. Em relação à densidade relativa, os valores variaram entre 2,314 g/cm³ e 2,403 g/cm³, sendo verificada tendência de aumento nas misturas com maiores teores de RAP. Esse comportamento indica maior compactação da estrutura mineral e menor presença de vazios intergranulares, aspecto que pode contribuir para a estabilidade da mistura, desde que mantido o equilíbrio adequado entre densidade, teor de ligante e volume de vazios.

Análise das misturas com e sem rejuvenescedor

A análise comparativa entre as misturas asfálticas com e sem adição de agente rejuvenescedor indicou que as formulações sem rejuvenescedor apresentaram desempenho superior em diferentes parâmetros técnicos. Os resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) variaram entre 1,38 MPa e 1,41 MPa, valores significativamente superiores ao mínimo de 0,65 MPa estabelecido pela DNIT 136/2018-ME. Esse comportamento indica maior resistência aos esforços de tração e menor suscetibilidade à fissuração. Além disso, a relação betume-vazios (RBV) das misturas sem rejuvenescedor variou entre 69,02% e 71,38%, permanecendo dentro da faixa normativa de 65% a 75% estabelecida pela DNIT 031/2024, o que demonstra adequado equilíbrio entre ligante, vazios e estrutura mineral. A densidade relativa dessas misturas atingiu valor de até 2,403 g/cm³, indicando maior compactação e menor tendência à infiltração de água, aspecto relevante para a durabilidade do revestimento asfáltico.

Com base nos dados obtidos, observou-se que a incorporação do agente rejuvenescedor influenciou diretamente a redução da resistência à tração por compressão diametral. A mistura com 30% de RAP sem rejuvenescedor apresentou RTCD média de 1,38 MPa, enquanto a mistura com 30% de RAP e 3% de rejuvenescedor apresentou valor de 0,56 MPa, ficando abaixo do limite mínimo adotado. Essa redução pode estar associada ao efeito

amolecedor do rejuvenecedor sobre o ligante envelhecido presente no RAP, uma vez que esse tipo de aditivo tende a reduzir a rigidez do material e melhorar sua capacidade de deformação. No entanto, nas condições avaliadas, essa alteração pode ter comprometido a resistência mecânica da mistura asfáltica, reforçando a necessidade de controle da dosagem e de avaliação conjunta entre trabalhabilidade, rigidez, deformabilidade e resistência, conforme os critérios aplicáveis às misturas recicladas e às especificações de serviço, como a DNIT 159/2011-ES.

Estabilidade e Fluência Marshall

A Estabilidade Marshall Corrigida, conforme a DNIT 447/2024 – ME, deve ser igual ou superior a 500 kgf, aproximadamente 5.000 N, de modo a indicar resistência estrutural mínima da mistura frente às solicitações impostas pelo tráfego. Todas as misturas analisadas atenderam a esse critério mínimo. De modo geral, as formulações sem adição de agente rejuvenecedor apresentaram os melhores resultados de estabilidade, evidenciando maior capacidade resistente, enquanto as misturas com rejuvenecedor apresentaram redução desse parâmetro, indicando menor resistência à deformação sob carregamento.

Entre as composições avaliadas, a mistura com 50% de RAP e 0% de rejuvenecedor apresentou o melhor desempenho, com estabilidade de 12.205 N, indicando maior resistência à compressão no ensaio Marshall. Por outro lado, a mistura com 30% de RAP e 3% de rejuvenecedor obteve o menor valor de estabilidade, correspondente a 6.481 N, embora ainda superior ao limite mínimo estabelecido. Esse comportamento sugere que, nas condições avaliadas, a incorporação do rejuvenecedor pode ter reduzido a rigidez e a resistência estrutural da mistura, especialmente em formulações com menor teor de RAP. Os resultados também indicaram que as misturas sem rejuvenecedor apresentaram menores valores de fluência, refletindo maior rigidez e menor deformabilidade, enquanto as misturas com rejuvenecedor apresentaram valores mais elevados, associados a maior flexibilidade, porém com possível redução da resistência estrutural.

Com base na DNIT 447/2024 – ME, que define a fluência Marshall como a deformação total correspondente à carga máxima, e na DNIT 031/2024 – ES, que estabelece critérios para o desempenho de misturas asfálticas, observou-se que a mistura com 40% de RAP e 0% de rejuvenecedor apresentou o comportamento mais satisfatório quanto à fluência,

com valor de 1,41 mm, indicando equilíbrio entre resistência mecânica e deformabilidade. As misturas com 30% de RAP e 0% de rejuvenescedor, com 1,38 mm, e 40% de RAP e 3% de rejuvenescedor, com 1,44 mm, também apresentaram desempenho adequado. Em contrapartida, as misturas com 50% de RAP e 3% de rejuvenescedor, com 3,73 mm, e 0% de RAP e 0% de rejuvenescedor, com 4,10 mm, apresentaram fluências mais elevadas, indicando maior suscetibilidade a deformações permanentes e possível comprometimento da durabilidade do pavimento sob condições severas de tráfego.

4.3. Análise de custos

A análise de custos indicou redução progressiva do custo estimado das misturas asfálticas com o aumento do teor de RAP incorporado. Conforme apresentado na Tabela 5, os custos associados ao ligante asfáltico diminuíram à medida que se elevou a porcentagem de RAP nas formulações, passando de R\$ 206,44/t na mistura de referência para R\$ 102,68/t na mistura com 50% de RAP e 3% de rejuvenescedor. Esse comportamento está relacionado à contribuição do ligante envelhecido presente no material fresado, que reduz a demanda por ligante asfáltico novo.

Com relação aos agregados, a Tabela 6 também evidencia redução dos custos com o aumento da incorporação de RAP. A mistura de referência apresentou custo de agregados igual a R\$ 102,50/t, enquanto as misturas com RAP apresentaram valores progressivamente menores, chegando a R\$ 59,44/t na composição com 50% de RAP e 3% de rejuvenescedor. Essa redução ocorre porque o RAP atua como substituto parcial dos agregados virgens, contribuindo para diminuir o consumo de gnaiss na composição das misturas.

Tabela 5 - Comparação de preços para cada mistura asfáltica, tendo como base o ligante asfáltico.

Mistura	Custo ligante (R\$/ton)	% Custo ligante em relação mistura sem RAP	Economia porcentual
30%RAP e 0%Rej	R\$ 156,64	75,88%	24,12%
30%RAP e 3%Rej	R\$ 142,15	68,86%	31,14%
40%RAP e 0%Rej	R\$ 130,02	62,98%	37,02%
40%RAP e 3%Rej	R\$ 123,14	59,65%	40,35%
50%RAP e 0%Rej	R\$ 111,37	53,95%	46,05%
50%RAP e 3%Rej	R\$ 102,68	49,74%	50,26%
0%RAP e 0%Rej	R\$ 206,44	100,00%	0,00%

Tabela 6 - Comparação de preços para cada mistura asfáltica, tendo como base o agregado de gnaiss.

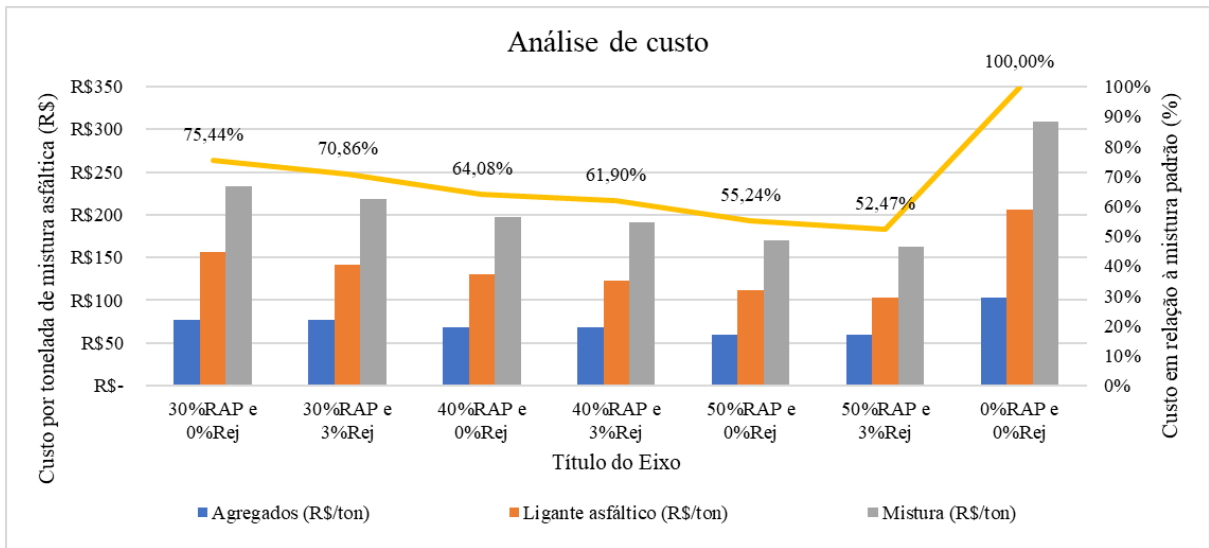
Mistura	Custo de agregados (R\$/ton)	% Custo agregado em relação mistura sem RAP	% Economia nos agregados
30%RAP e 0%Rej	R\$ 76,44	74,57%	25,43%
30%RAP e 3%Rej	R\$ 76,76	74,89%	25,11%
40%RAP e 0%Rej	R\$ 67,96	66,30%	33,70%
40%RAP e 3%Rej	R\$ 68,09	66,43%	33,57%
50%RAP e 0%Rej	R\$ 59,29	57,84%	42,16%
50%RAP e 3%Rej	R\$ 59,44	57,99%	42,01%
0%RAP e 0%Rej	R\$ 102,50	100,00%	0,00%

Tabela 7 - Comparação de preços para cada mistura asfáltica.

Mistura	Custo total da mistura asfáltica (R\$/ton)	% Custo total em relação mistura sem RAP	% Economia na mistura
30%RAP e 0%Rej	R\$ 233,08	75,44%	24,56%
30%RAP e 3%Rej	R\$ 218,91	70,86%	29,14%
40%RAP e 0%Rej	R\$ 197,98	64,08%	35,92%
40%RAP e 3%Rej	R\$ 191,23	61,90%	38,10%
50%RAP e 0%Rej	R\$ 170,66	55,24%	44,76%
50%RAP e 3%Rej	R\$ 162,12	52,47%	47,53%
0%RAP e 0%Rej	R\$ 308,94	100,00%	0,00%

A partir da soma dos custos parciais de ligante e agregados, sintetizada na Tabela 7, observou-se que a mistura de referência apresentou o maior custo total estimado, correspondente a R\$ 308,94/t. As misturas com 30% de RAP apresentaram custos totais de R\$ 233,08/t, sem rejuvenescedor, e R\$ 218,91/t, com 3% de rejuvenescedor. Para as misturas com 40% de RAP, os custos foram de R\$ 197,98/t e R\$ 191,23/t, respectivamente. Já as misturas com 50% de RAP apresentaram os menores valores, sendo R\$ 170,66/t para a composição sem rejuvenescedor e R\$ 162,12/t para a composição com 3% de rejuvenescedor, conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 30 - Gráfico de Relação de Custos



Esses resultados demonstram que o aumento do teor de RAP proporcionou economia expressiva em relação à mistura de referência, conforme evidenciado na Tabela 7 e ilustrado na Figura 30. As reduções estimadas foram de aproximadamente 24,56% e 29,14% para as misturas com 30% de RAP, 35,92% e 38,10% para as misturas com 40% de RAP, e 44,76% e 47,53% para as misturas com 50% de RAP, considerando, respectivamente, as composições sem e com rejuvenescedor.

Do ponto de vista estritamente econômico, a mistura com 50% de RAP e 3% de rejuvenescedor apresentou a maior redução de custo entre as composições avaliadas. Entretanto, essa alternativa não deve ser considerada isoladamente como a solução tecnicamente mais adequada, uma vez que a escolha da formulação final deve levar em conta também o atendimento aos parâmetros volumétricos e mecânicos, como volume de vazios, VAM, relação Filler/Asfalto, estabilidade Marshall, fluência Marshall e RTCD. Dessa forma, a análise econômica deve ser compreendida como complementar à avaliação técnica, contribuindo para demonstrar o potencial de viabilidade do uso do RAP, mas sem substituir a verificação do desempenho da mistura.

4.4. Determinação da massa unitária de agregados em estado solto

A determinação da massa unitária em estado solto foi realizada com o objetivo de avaliar o comportamento dos materiais quando dispostos sem compactação, condição

semelhante àquela observada em situações de armazenamento, transporte e manuseio dos agregados e do RAP.

Entre os materiais avaliados, o pó de pedra apresentou a maior massa unitária média, igual a 1610,62 kg/m³, com desvio padrão de 5,33 kg/m³. Esse resultado está associado à maior presença de partículas finas, que favorecem o preenchimento dos vazios entre os grãos e aumentam a densidade aparente do material em estado solto. A Brita 1 apresentou massa unitária média de 1406,52 kg/m³, com desvio padrão de 8,56 kg/m³, enquanto a Brita 0 apresentou valor médio de 1329,76 kg/m³, com desvio padrão de 4,80 kg/m³. Esses resultados indicam diferenças relacionadas à granulometria, ao tamanho das partículas e ao arranjo dos grãos no recipiente.

O RAP apresentou massa unitária média de 1307,57 kg/m³, com desvio padrão de 2,03 kg/m³, sendo o menor valor entre os materiais analisados. Esse comportamento pode estar relacionado à sua composição heterogênea, formada por agregados recobertos por ligante asfáltico envelhecido, além da possível presença de partículas aglomeradas e vazios internos decorrentes do processo de fresagem. Dessa forma, quando disposto em estado solto, o RAP tende a ocupar maior volume para uma mesma massa em comparação a materiais mais densos ou com melhor empacotamento granular.

De modo geral, os resultados demonstram que a massa unitária em estado solto varia de acordo com as características físicas e granulométricas de cada material. No caso do RAP, esse parâmetro é especialmente relevante para estimativas de volume em operações de transporte, armazenamento temporário e reaproveitamento do material fresado. Assim, embora a massa unitária solta não represente a condição compactada da camada asfáltica no pavimento, ela contribui para o planejamento operacional da gestão do RAP, reforçando a importância de análises ambientais e econômicas que avaliem sua viabilidade de reaproveitamento e sua destinação adequada.

4.5. Simulação para quantificação volumétrica de resíduos sólidos de fresagem (RAP)

A simulação foi desenvolvida a partir dos quantitativos disponíveis nos documentos do Programa Conserva Pro. Como os documentos não apresentam a largura das vias ou faixas a serem fresadas, não foi possível estimar o volume pela relação entre extensão e largura da pista. Por isso, adotou-se a área diretamente informada no Projeto Básico/Executivo, correspondente a 80.000 m² de fresagem descontínua por lote, com espessura de 3 cm.

Considerando que esse serviço está previsto em seis lotes — do Lote 1 ao Lote 7, com exceção do Lote 6 — a área total considerada foi:

$$A = 80.000 \cdot 6 \rightarrow A = 480.000 \text{ m}^2$$

Com base nessa área e na espessura de fresagem de 0,03 m, estimou-se o volume da camada asfáltica removida em condição compactada na pista:

$$V = 480.000 \cdot 0,03 = 14.400 \text{ m}^3$$

Assim, o volume compactado de pavimento removido foi estimado em 14.400 m³. Esse valor representa a camada asfáltica ainda na condição em que se encontra na pista, antes da desagregação provocada pelo processo de fresagem.

Para converter esse volume em massa de RAP, utilizou-se a massa específica aparente da mistura asfáltica compactada, associada ao valor médio de G_{mb} , uma vez que a massa deve ser estimada considerando a condição compactada do revestimento no pavimento. Com base nos dados atualizados, o G_{mb} médio obtido foi de 2,333, com desvio padrão de 0,039. A absorção de água média foi de 0,18%, com desvio padrão de 0,11%, indicando baixa absorção pela mistura compactada. Para a simulação, utilizou-se o valor médio de G_{mb} , convertido para kg/m³:

$$G_{mb} = 2,333 \text{ g/cm}^3 \rightarrow \rho = 2,333 \cdot 1.000 \rightarrow \rho = 2.333 \text{ kg/m}^3$$

A massa total de RAP gerada pela fresagem foi então calculada por:

$$M = 14.400 \cdot 2333 \rightarrow M = 33.595.200 \text{ kg} \rightarrow M = 33.595,2 \text{ t}$$

Dessa forma, a fresagem dos seis lotes analisados resultaria em aproximadamente 33.595,2 toneladas de RAP. Esse valor representa a massa efetivamente removida da pista, sendo o parâmetro mais adequado para estimativas de reaproveitamento do material em novas misturas asfálticas e para balanços de substituição de agregados e ligante virgens.

Após a estimativa da massa, utilizou-se a massa unitária solta média do RAP, igual a 1307,57 kg/m³, para calcular o volume que esse material passa a ocupar após a fresagem, em condição solta. Essa etapa é necessária porque a fresagem não altera a massa do material, mas

aumenta seu volume devido à fragmentação e à perda do empacotamento da camada compactada.

$$V_{solto} = \frac{33.595,200}{1.307,57} \rightarrow V_{solto} = 25.692,85 \text{ m}^3$$

Portanto, embora o volume compactado removido da pista seja de 14.400 m³, o volume operacional do RAP em estado solto foi estimado em aproximadamente 25.692,85 m³. Esse resultado indica um aumento de aproximadamente 78,42% no volume a ser considerado nas etapas de carregamento, transporte, armazenamento temporário ou destinação.

Considerando caminhões com capacidade volumétrica de 10 m³, o número estimado de viagens necessárias para o transporte do RAP em estado solto foi:

$$N = \frac{25.758,98}{10} \rightarrow N = 2.569,29$$

Arredondando para o número inteiro superior, seriam necessárias aproximadamente 2570 viagens de caminhão para transportar o RAP gerado. Esse valor evidencia a importância de trabalhar com o volume solto do material quando o objetivo é avaliar aspectos logísticos da gestão do resíduo.

Além disso, o Projeto Básico/Executivo apresenta o item “Transporte da pista até o bota-fora – Material fresado”, com unidade em m³·km e quantidade de 24000 m³·km por lote. O documento, entretanto, não informa a localização do bota-fora, a rota de transporte ou a distância real percorrida. Por esse motivo, a distância média de transporte foi inferida a partir do próprio quantitativo contratual disponível. Para os seis lotes analisados, tem-se:

$$T = 24.000 \cdot 6 \rightarrow T = 144.000 \text{ m}^3 \cdot \text{km}$$

Como o volume compactado removido da pista foi estimado em 14.400 m³, a distância média de transporte considerada no documento pode ser obtida por:

$$DMT = \frac{144.000}{14.400} \rightarrow DMT = 10 \text{ km}$$

Assim, infere-se que o quantitativo previsto no Projeto Básico/Executivo considera uma distância média de aproximadamente 10 km entre a pista e o bota-fora. Essa distância

não corresponde necessariamente a uma rota real medida em campo, mas constitui um parâmetro de referência extraído dos próprios dados disponíveis no documento.

Aplicando essa distância média ao volume do RAP em estado solto, obteve-se o momento operacional de transporte:

$$T_{solto} = 25.692,85 \cdot 10 \rightarrow T_{solto} = 256.928,5 \text{ m}^3 \cdot \text{km}$$

Esse resultado demonstra que, embora o quantitativo previsto no documento seja calculado a partir do volume compactado removido na pista, o volume operacional associado ao transporte e ao armazenamento do RAP em estado solto é superior. Assim, a utilização da massa unitária solta permite aproximar a simulação das condições práticas de logística, indicando maior demanda por viagens, capacidade de transporte e área de acondicionamento temporário ou destinação.

De modo geral, a simulação demonstra que a fresagem dos seis lotes analisados pode gerar aproximadamente 14.400 m³ de material removido em condição compactada, correspondendo a cerca de 33.595,2 toneladas de RAP. Após a fresagem, esse material passa a ocupar aproximadamente 25.692,85 m³ em estado solto, demandando cerca de 2.570 viagens de caminhão com capacidade de 10 m³. A partir dos quantitativos de transporte presentes no Projeto Básico/Executivo, estimou-se ainda uma distância média de 10 km até o bota-fora, resultando em um momento operacional de transporte de aproximadamente 256.928,5 m³·km. Esses resultados reforçam a importância de diferenciar o volume compactado na pista, a massa efetivamente gerada e o volume solto para transporte, pois cada parâmetro possui função distinta no planejamento da gestão do RAP.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu analisar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da incorporação do asfalto fresado, denominado Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), em misturas asfálticas destinadas à camada de rolamento, utilizando gnaiss como agregado mineral virgem convencional. A partir dos resultados experimentais obtidos na Iniciação Científica, verificou-se que o RAP apresenta potencial de reaproveitamento, desde que sua aplicação seja acompanhada por adequada caracterização, dosagem e controle tecnológico. Os

ensaios de caracterização dos agregados indicaram comportamento compatível com o uso em pavimentação, especialmente pelos resultados de Abrasão Los Angeles, granulometria e desempenho das frações graúdas. Entretanto, parâmetros como índice de forma, perda ao choque Treton e adesividade demonstraram a importância de avaliar conjuntamente as propriedades dos agregados e sua interação com o ligante, uma vez que esses fatores influenciam diretamente a durabilidade da mistura.

Quanto ao desempenho mecânico, as misturas com RAP sem adição de rejuvenescedor apresentaram, de modo geral, melhor comportamento, especialmente nos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) e Estabilidade Marshall. As composições com 40% e 50% de RAP sem rejuvenescedor alcançaram RTCD de 1,41 MPa, valor superior ao mínimo de 0,65 MPa estabelecido para concretos asfálticos. Contudo, a análise integrada dos parâmetros volumétricos e mecânicos mostrou que o maior teor de RAP nem sempre representa a alternativa tecnicamente mais adequada, pois as misturas com 50% de RAP apresentaram relação Filler/Asfalto acima da faixa recomendada. Assim, entre as composições avaliadas, a mistura com 40% de RAP sem rejuvenescedor apresentou o comportamento mais equilibrado, conciliando elevada resistência à tração, estabilidade satisfatória e atendimento aos principais parâmetros volumétricos.

A análise econômica evidenciou que a incorporação de RAP contribui para reduzir os custos estimados das misturas asfálticas. A mistura de referência apresentou custo total de R\$ 308,94/t, enquanto as misturas com RAP apresentaram reduções progressivas conforme o aumento do teor de material fresado. As economias estimadas foram de 24,56% e 29,14% para as misturas com 30% de RAP, 35,92% e 38,10% para as misturas com 40% de RAP, e 44,76% e 47,53% para as misturas com 50% de RAP, considerando, respectivamente, as composições sem e com rejuvenescedor. A maior economia foi obtida na mistura com 50% de RAP e 3% de rejuvenescedor, com custo total de R\$ 162,12/t; porém, essa formulação apresentou limitações técnicas, como VAM, relação Filler/Asfalto e fluência Marshall. Portanto, a viabilidade econômica do RAP é evidente, mas sua aplicação deve ser definida pela análise conjunta entre custo, desempenho mecânico, comportamento volumétrico e durabilidade esperada.

A simulação para quantificação volumétrica e mássica do RAP aproximou os resultados laboratoriais de uma situação real de manutenção viária, reforçando a conexão entre geotecnia de pavimentos e planejamento urbano. Com base nos documentos do

Programa Conserva Pro, considerando seis lotes com área de fresagem de 80.000 m² cada e espessura de 3 cm, estimou-se a geração de aproximadamente 14.400 m³ de material removido em condição compactada, correspondendo a cerca de 33.595,2 toneladas de RAP. Após a fresagem, esse material passa a ocupar aproximadamente 25.692,85 m³ em estado solto, demandando cerca de 2.570 viagens de caminhão com capacidade de 10 m³. A partir dos quantitativos de transporte do Projeto Básico/Executivo, estimou-se ainda uma distância média de 10 km até o bota-fora, resultando em momento operacional de transporte de aproximadamente 256.928,5 m³·km. Esses resultados demonstram que a gestão do RAP deve considerar não apenas o volume removido da pista, mas também a massa gerada, o volume solto, a logística de transporte, o armazenamento temporário e as possibilidades de reaproveitamento.

Embora os resultados obtidos demonstrem o potencial do reaproveitamento do RAP em misturas asfálticas, algumas limitações metodológicas e experimentais devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A dosagem das misturas foi realizada pelo método Marshall, uma vez que o equipamento necessário para a aplicação da metodologia Superpave não se encontrava disponível durante o período de desenvolvimento da pesquisa. Além disso, a avaliação do desempenho das misturas restringiu-se aos ensaios executados em laboratório, não sendo possível realizar ensaios complementares, como módulo de resiliência, deformação permanente, fadiga, dano por umidade e trincamento, em razão das limitações de equipamentos e infraestrutura laboratorial. Tais aspectos não comprometem os resultados obtidos, mas indicam oportunidades para o aprofundamento da caracterização mecânica das misturas em estudos futuros.

Dessa forma, o trabalho reforça a importância do tema para a Engenharia Urbana, pois a manutenção de pavimentos envolve não apenas desempenho mecânico e escolha de materiais, mas também gestão de resíduos, logística, planejamento territorial e políticas públicas de reaproveitamento. A estimativa volumétrica e mássica do RAP pode auxiliar municípios e órgãos rodoviários na elaboração de contratos mais eficientes, na previsão de áreas de estocagem, no dimensionamento do transporte, no controle da destinação do material fresado e na inclusão de metas de reciclagem em programas de conservação viária. Assim, o estudo contribui para compreender o RAP não apenas como resíduo da fresagem, mas como insumo técnico e estratégico para práticas de pavimentação mais sustentáveis, alinhadas à economia circular, à redução do consumo de materiais virgens, à diminuição de passivos ambientais e ao planejamento da infraestrutura urbana e rodoviária.

6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se a realização de novos estudos experimentais com diferentes teores de RAP, incluindo porcentagens intermediárias entre 30%, 40% e 50%, bem como teores superiores, desde que acompanhados de controle tecnológico adequado. Também se sugere avaliar diferentes dosagens de agente rejuvenescedor e, se possível, diferentes tipos de rejuvenescedores, a fim de compreender melhor sua influência sobre a rigidez, a trabalhabilidade, a resistência à tração e o comportamento volumétrico das misturas. Além disso, a utilização de outros agregados minerais, com diferentes origens litológicas, poderia contribuir para verificar se os resultados obtidos com o gnaiss se mantêm em outras composições granulométricas e mineralógicas.

Também se recomenda que estudos futuros ampliem a avaliação mecânica das misturas asfálticas recicladas, incorporando ensaios mais avançados de desempenho, como módulo de resiliência ou módulo dinâmico, deformação permanente, fadiga, dano por umidade e ensaios de trincamento. A adoção de metodologias de dosagem e compactação diferentes da Marshall, como a metodologia Superpave, também poderia aprimorar a análise, por representar de forma mais adequada as condições de compactação e desempenho em campo. Esses avanços permitiriam uma avaliação mais completa da viabilidade técnica do RAP, especialmente em misturas com teores mais elevados de material fresado.

Portanto, sugere-se aprofundar a análise ambiental e logística do reaproveitamento do RAP, especialmente por meio de estudos de Avaliação do Ciclo de Vida, considerando emissões associadas ao transporte, consumo de combustível, distância até áreas de bota-fora, necessidade de viagens de caminhão e alternativas de reciclagem in loco. Essa abordagem permitiria comparar os impactos da destinação convencional do material fresado com cenários de reaproveitamento no próprio sistema viário, evidenciando ganhos potenciais em termos de redução de emissões, menor demanda por áreas de disposição, economia de materiais virgens e maior sustentabilidade nos contratos públicos de manutenção viária.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDO, Ahmad M. Utilizing reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in new pavements: a review. *International Journal of Thermal & Environmental Engineering*, v. 12, n. 1, p. 61–66, 2016.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. AASHTO T 308 – Determining the asphalt binder content of hot mix asphalt (HMA) by the ignition method. Washington, D.C., s.d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil — Execução de camadas de pavimentação — Procedimentos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004. Acesso em: 01 fev. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil — Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural — Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004. Acesso em: 01 fev. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Painel dinâmico do mercado brasileiro de asfaltos. Brasília, DF: ANP, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-dinamicos-do-abastecimento/painel-dinamico-do-mercado-brasileiro-de-asfaltos>. Acesso em: 26 nov. 2025.

AHMED, H. M.; ABDELHAFFEZ, G. S.; AHMED, A. A. Potential use of marble and granite solid wastes as environmentally friendly coarse particulate in civil constructions. *International Journal of Environmental Science and Technology*, [s.l.], v. 19, n. 2, p. 889–896, 2022.

AQUINO, Dádna Jordana Barros; DIAS, Thaynara Sousa Castro. Utilização de resíduos da construção civil em pavimentos asfálticos: uma revisão. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D5444-24: Standard test method for mechanical size analysis of extracted aggregate from bituminous paving mixtures. West Conshohocken: ASTM International, 2024. Acesso em: 04 nov. 2025.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D6307-19: Standard test method for asphalt content of asphalt mixture by ignition method. West Conshohocken: ASTM International, 2019. Acesso em: 03 jan. 2026.

BALBO, José Tadeu. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

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

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS; ABEDA, 2022.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, DF, 2002. Acesso em: 03 dez. 2025.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER. DNER-ME 035/98 – Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles” – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. DNIT 136/2018-ME – Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Brasília: DNIT, 2018.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER. DNER-ME 054/97 – Agregados – Determinação do equivalente de areia – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1997.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER. DNER-ME 399/99 – Agregados – determinação da perda ao choque no aparelho Treton. Rio de Janeiro: DNER, 1999.

Disponível

em:

https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/cole-tanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner_me_399_99.pdf. Acesso em: 21 fev. 2025.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. DNIT 411-ME – Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da massa específica, densidade relativa e absorção do agregado miúdo – Método de ensaio. Brasília, 2021.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. DNIT 412/2019-ME – Pavimentação – Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio. Brasília, 2019.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. DNIT 413-ME – Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da massa específica, densidade relativa e absorção do agregado graúdo – Método de ensaio. Brasília, 2021.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. DNIT ME 424/2020 – Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com crivos – Método de ensaio. Brasília, 2020.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. DNIT ME 425/2020 – Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com paquímetro – Método de ensaio. Brasília, 2020.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. DNIT 428/2022-ME – Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da massa específica aparente, da densidade relativa aparente e da absorção de água de corpos de prova compactados – Método de ensaio. Brasília: DNIT, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/cole-tanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_428_2022_me.pdf. Acesso em: 21 fev. 2025.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. DNIT 447/2024-ME – Misturas asfálticas – Ensaio de estabilidade e fluência Marshall – Método de ensaio (com incorporação da Errata 1). Brasília: DNIT, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/cole-tanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_447_2024_me_estabilidade_marshall_com_incorporacao_errata_1.pdf. Acesso em: 21 fev. 2025.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 450/2024-ME: equivalente de areia: método de ensaio. Brasília: DNIT, 2024.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 451/2024-ME: agregados: determinação do desgaste por abrasão e impacto no equipamento “Los Angeles”: método de ensaio. Brasília: DNIT, 2024.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 452/2024-ME: agregado graúdo: adesividade ao ligante asfáltico: método de ensaio. Brasília: DNIT, 2024.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. DNIT 031/2024-ES – Pavimentação – Concreto asfáltico – Especificação de serviço (com incorporação da Errata 1). Brasília: DNIT, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_031_2024_es_com_incorporacao_da_errata-1.pdf. Acesso em: 21 fev. 2025.

CASSILHA, Gilda A.; CASSILHA, Simone A. Planejamento urbano e meio ambiente. Curitiba: IESDE Brasil S.A., 2009. 176 p. ISBN 978-85-7638-766-4.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Pesquisa CNT de rodovias 2025. Brasília, DF: CNT; SEST SENAT; ITL, 2025a. 219 p. Disponível em: <https://cnt.org.br/pesquisa-rodovias>. Acesso em: 08 jul. 2026.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Radar CNT do Transporte: pontos críticos 2025. Brasília, DF: CNT, 2025b. Disponível em: <https://cnt.org.br/pesquisa-rodovias>. Acesso em: 08 jul. 2026.

CONSÓRCIO REGIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO (CONSANE). Produto 8: Plano Municipal de Saneamento Básico (PLAMSAB) – Ouro Preto/MG: Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS). Lavras, MG: CONSANE, 2025. Disponível em: arquivo PDF (fornecido pelo autor). Acesso em: 04 nov. 2025.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO – DER/SP. ET-DE-P00/027 B – Concreto asfáltico. São Paulo: DER/SP, 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT 437/2022 – ME: Agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios de agregados em estado solto e compactado – método de ensaio. Brasília, DF: DNIT, 2022.

DOS SANTOS, R. L. R.; RODRIGUES, C. de S.; CAMARGO, V. A. F.; PEREIRA, A. B.; RABELO, J. M. G. Analysis of the resilient modulus and California bearing ratio in mixtures containing slate waste and clayey soil. REM – International Engineering Journal, [s.l.], v. 74, n. 4, 2021.

ESCAVY, J. I.; HERRERO, M. J.; LOPEZ-ACEVEDO, F.; TRIGOS, L. The progressive distancing of aggregate quarries from the demand areas: magnitude, causes, and impact on CO₂ emissions in Madrid Region (1995–2018). Resources Policy, [s.l.], v. 75, 2022.

FANG, Ying; ZHANG, Zhengqi; LI, Xinjun; YANG, Jianhua. Comprehensive review on the application of bio-rejuvenator in the regeneration of waste asphalt materials. Construction and Building Materials, [s.l.], v. 295, art. 123631, 2021.

FHWA (2011): FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, 2011. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/11021/001.cfm>.

Acesso em: 11 jan. 2026.

JAHANGIRI, B.; BAEZ, A.; LI, H.; UPADHYAYA, R.; ZAMAN, M.; NAZARIAN, S.; SCULLION, T. Rejuvenators for asphalt recycling: a critical review. Construction and Building Materials, [S.l.], v. 246, art. 118428, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118428.

JALALIAN, M. H.; BAGHERPOUR, R.; KHOSHOUEI, M. Wastes production in dimension stones industry: resources, factors, and solutions to reduce them. Environmental Earth Sciences, [s.l.], v. 80, n. 17, 2021.

JI, Jie; YAO, Hui; SUO, Zhi; YOU, Zhanping; LI, Haoxin; XU, Shifa; SUN, Lijun. Effectiveness of vegetable oils as rejuvenators for aged asphalt binders. Journal of Materials in Civil Engineering, [s.l.], 2017.

MENDONÇA, Whilison Marques. Desempenho da eliminação de quartzito como agregado em camadas de base e revestimento de pavimentos. 2023. 166 f. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Núcleo de Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Ouro Preto, 2023.

MENDONÇA, Whilison M.; MARQUES, Geraldo L. O.; GOMES, Guilherme J. C. et al. Geotechnical performance of isotropic and foliated quartzite waste as aggregate for road base and asphalt mixture. *Transportation Geotechnics*, [s.l.], v. 46, art. 101242, 2024. DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101242.

MINAS GERAIS. Departamento de Edificações e Estradas de Rodagem de Minas Gerais – DER-MG. Projeto básico ou executivo – Conserva Pro (Anexo XVI, SEI nº 73121410). Belo Horizonte, 2023. Documento eletrônico.

MINAS GERAIS. Departamento de Edificações e Estradas de Rodagem de Minas Gerais – DER-MG. Termo de Referência – Conserva Pro (Anexo I, SEI nº 73121302). Belo Horizonte, s.d. Documento eletrônico.

MINAS GERAIS. Departamento de Edificações e Estradas de Rodagem de Minas Gerais – DER-MG. Termo de Referência – Conserva Pro (Anexo I, SEI nº 90715859). Belo Horizonte, s.d. Documento eletrônico.

MOHANTA, N. R.; MURMU, M. Alternative coarse aggregate for sustainable and eco-friendly concrete: a review. *Journal of Building Engineering*, [s.l.], v. 59, 2022.

MULATU, A.; QUEZON, E. T.; GUDINA, O. Evaluation of the HMA performance using combined effects of marble waste dust filler and Superpave aggregate gradation. *Australian Journal of Civil Engineering*, [s.l.], v. 19, n. 2, p. 184–194, 2021. DOI: 10.1080/14488353.2020.1854942.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2026.

O'BRIEN, J. Growing global aggregates sustainably. *Aggregates Business*, [s.l.], 2021. Disponível em: <https://www.aggbusiness.com/feature/growing-global-aggregates-sustainably>. Acesso em: 12 jan. 2026.

OLIVEIRA, M. S.; FARIAS, M. M. de; SILVA, J. P. S. Fatigue analysis of hot recycled asphalt mixtures with RAP incorporation. *Case Studies in Construction Materials*, [s.l.], v. 16, e01132, 2022.

PIRACELLI, V.; AMADOR, I.; SABINO, F.; PINTO, J.; SILVA JR., C.; SOLCI, M. C. Emissões de poluentes atmosféricos em condições reais de pavimentação asfáltica: material particulado, black carbon e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. *Química Nova*, [s.l.], 2020.

PRADYUMNA, T. Anil; MITTAL, Abhishek; JAIN, P. K. Characterization of reclaimed asphalt pavement (RAP) for use in bituminous road construction. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, [s.l.], v. 104, p. 1149–1157, 2013. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.11.211.

QIAO, Y.; SANTOS, J.; STONER, A. M. K.; FLINTSCH, G. Climate change impacts on asphalt road pavement construction and maintenance: an economic life cycle assessment of adaptation measures in the State of Virginia, United States. *Journal of Industrial Ecology*, [s.l.], v. 24, n. 2, p. 342–355, 2020.

RAJIB, A. I.; SAMIEADEL, A.; ZALGHOUT, A.; KALOUSH, K. E.; SHARMA, B. K.; FINI, E. H. Do all rejuvenators improve asphalt performance? *Road Materials and Pavement Design*, [s.l.], v. 23, n. 2, p. 358–376, 2022. DOI: 10.1080/14680629.2020.1826348.

RODRIGUES, Conrado de Souza; SANTOS, Raphael. Aplicação do resíduo proveniente do corte de ardósia em pavimentação rodoviária. 2016. Documento de conferência.

PRADHAN, Sujit Kumar; SAHOO, Umesh Chandra. Influence of softer binder and rejuvenator on bituminous mixtures containing reclaimed asphalt pavement (RAP) material. *International Journal of Transportation Science and Technology*, [s.l.], v. 11, n. 1, p. 46–59, 2022. DOI: 10.1016/j.ijtst.2020.12.001.

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

SILVA, Otávio; UMADA, Murilo; POLASTRI, Paula; NETO, Generoso; ANGELIS, Bruno; MIOTTO, José. Etapas do gerenciamento de resíduos da construção civil – Construction and demolition waste management stages. *Revista Monografias Ambientais*, Santa Maria, v. 19, p. 39–48, 2015. DOI: 10.5902/2236117020558.

SPEIGHT, J. G. Asphalt paving. In: *ASPHALT materials science and technology*. [s.l.]: Elsevier, 2016. p. 409–435.

SUO, Zhi et al. Recovering aged bitumen with vegetable oil. *Frontiers in Materials*, [s.l.], 2021. DOI: 10.3389/fmats.2021.650809.

TSAKOUMAKI, Maria; PLATI, Christina. A critical overview of using reclaimed asphalt pavement (RAP) in road pavement construction. *Infrastructures*, [s.l.], v. 9, art. 128, 2024. DOI: 10.3390/infrastructures9080128. Acesso em: 06 fev. 2026.

URAL, N.; YAKŞE, G. Utilization of marble piece wastes as base materials. *Open Geosciences*, [s.l.], v. 12, n. 1, 2020.

VIANA, H. Notas de aulas de Pavimentação (parte 7): Tema: Agregados (2ª parte). [s.l.]: [s.n.], [s.d.]. Disponível em: <https://engcivil20142.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/03/notas-de-aulas-parte-7-paviment.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2026.

WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (WSDOT). Standard method of test for determining the asphalt binder content of hot mix asphalt (HMA) by the ignition method – T 308. Washington: WSDOT, 2020. Disponível em: <https://wsdot.wa.gov/publications/manuals/fulltext/m46-01/t308.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2026.

XING, C.; LI, M.; LIU, L.; LU, R.; LIU, N.; WU, W.; YUAN, D. A comprehensive review on the blending condition between virgin and RAP asphalt binders in hot recycled asphalt mixtures: mechanisms, evaluation methods, and influencing factors. *Journal of Cleaner Production*, [s.l.], v. 398, art. 136515, 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136515.

ZALGHOUT, Ali; CASTRO, Samuel; KARAM, Jolina; KALOUSH, Kamil. Laboratory and field evaluation of plant produced asphalt mixtures containing RAP in hot climate: a case

study from Phoenix, Arizona. *Construction and Building Materials*, [s.l.], v. 351, art. 128322, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128322.