



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

GABRIEL NAKAHARADA CAMELO

AVALIAÇÃO DO USO DE FRESADO EM MISTURAS ASFÁLTICAS

CARAÚBAS

2025

GABRIEL NAKAHARADA CAMELO

AVALIAÇÃO DO USO DE FRESADO EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Thiago De Jesus Souza.

CARAÚBAS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

C181a Camelo, Gabriel Nakaharada.
Avaliação do uso de fresado em misturas
asfálticas / Gabriel Nakaharada Camelo. - 2025.
65 f. : il.

Orientador: Thiago De Jesus Souza .
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2025.

1. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). 2.
Reciclagem. 3. Sustentabilidade. 4. Ligante
asfáltico (CAP). I. Souza , Thiago De Jesus,
orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Sarah Freire Bezerra
CRB: 15/1052

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

GABRIEL NAKAHARADA CAMELO

AVALIAÇÃO DO USO DE FRESADO EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: ____ / ____ / 2 ____.

BANCA EXAMINADORA

Thiago De Jesus Souza, Prof. (UFERSA)
Presidente

Jennef Carlos Tavares, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Samara Beatriz da Silva Vieira, Prof. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, sabedoria e saúde para vencer cada etapa desta caminhada.

Ao meu orientador, Professor Thiago de Jesus Souza, pela orientação técnica, disponibilidade e incentivo contínuo durante a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Wellington Lorrان, por todo o apoio, contribuições e ensinamentos que foram fundamentais ao longo da jornada acadêmica.

Expresso minha profunda gratidão à minha namorada, Luilma Celineide de Carvalho Lima, por estar ao meu lado em todos os momentos, oferecendo amor, apoio e motivação ao longo dos anos em que cursamos Engenharia Civil.

Estendo meus agradecimentos à minha família, pela base sólida que sempre me proporcionou, e aos meus amigos, que contribuíram com companheirismo, palavras de incentivo e momentos de alívio em meio aos desafios da graduação.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa trajetória, o meu sincero agradecimento.

Engenharia Civil não é sobre construir coisas,
mas sim, executar sonhos.

Leonardo Alves

RESUMO

A necessidade da implementação de soluções sustentáveis na engenharia de pavimentos tem incentivado a adoção de técnicas de reutilização de materiais. Dentre essas técnicas, destaca-se o uso do material fresado de pavimentos asfálticos, também conhecido como Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), em novas misturas asfálticas. A pesquisa tem o objetivo de entender a viabilidade técnica, a sustentabilidade e o desempenho mecânico dessa abordagem. Com isso, o estudo procedeu inicialmente com a caracterização detalhada dos materiais e a produção de nove corpos de prova: três sem RAP, três com RAP incorporado a frio e três com RAP incorporado a quente. Todos eles foram preparados com 5% de CAP, ajustando-se o teor para compensar o ligante residual do RAP. Os ensaios laboratoriais seguiram rigorosamente os procedimentos da metodologia Marshall e da norma DNIT 136/2018, avaliando parâmetros essenciais como Volume de Vazios (V_v), Vazios do Agregado Mineral (VAM), Vazios Com Betume (VCB), Relação Betume/Vazios (RBV) e Resistência à Tração (σ_R). Os resultados evidenciaram que a forma de incorporação do RAP exerce influência direta sobre o desempenho da mistura. A incorporação a quente apresentou melhor desempenho, com maior ativação do ligante, melhores níveis de compactação e menores teores de vazios. Em contrapartida, as misturas com RAP incorporado a frio apresentaram maior percentual de vazios e menor resistência à tração. Embora nenhuma das amostras recicladas tenha atingido o valor mínimo de 0,65 MPa exigido pela DNIT 031/2024 para resistência à tração. Em síntese, esta pesquisa conclui que a reutilização do RAP, especialmente quando incorporado a quente, representa uma estratégia valiosa para a construção de pavimentos mais duráveis, econômicos e alinhados com os princípios da sustentabilidade.

Palavras-chave: Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Reciclagem. Sustentabilidade. Ligante asfáltico (CAP).

ABSTRACT

The need for implementing sustainable solutions in pavement engineering has encouraged the adoption of material reuse techniques. Among these techniques, the use of milled asphalt pavement material, also known as Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), in new asphalt mixtures stands out. This research aims to assess the technical feasibility, sustainability, and mechanical performance of this approach. To this end, the study began with a detailed characterization of the materials and the preparation of nine specimens: three without RAP, three with cold RAP incorporation, and three with hot RAP incorporation. All samples were produced with 5% asphalt cement (CAP), adjusting the binder content to account for the residual binder present in the RAP. Laboratory tests strictly followed the procedures established by the Marshall methodology and the DNIT 136/2018 standard, evaluating key parameters such as Air Voids (V_v), Voids in the Mineral Aggregate (VMA), Voids Filled with Bitumen (VFB), Bitumen/Void Ratio (BVR), and Tensile Strength (σ_R). The results showed that the method of RAP incorporation has a direct influence on the mixture's performance. Hot incorporation demonstrated superior results, with better binder activation, improved compaction levels, and lower void content. In contrast, mixtures with cold-incorporated RAP exhibited higher air void content and lower tensile strength. However, none of the recycled samples met the minimum tensile strength requirement of 0.65 MPa established by DNIT 031/2024. In summary, this study concludes that the reuse of RAP particularly when incorporated hot represents a valuable strategy for the construction of more durable, cost-effective, and environmentally sustainable pavements.

Keywords: Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Recycling. Sustainability. Asphalt binder (CAP).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pavimento asfáltico.....	20
Figura 2: Carga no pavimento flexível.....	21
Figura 3: Carga no pavimento rígido.....	22
Figura 4: Processo de fresagem e recolhimento do material.....	30
Figura 5: Material RAP.....	31
Figura 6: Agregados, CAP 50/70 e RAP.....	34
Figura 7: Curva de Viscosidade Saybolt Furol – CAP 50/70.....	37
Figura 8: Fluxograma das Misturas Asfálticas.....	38
Figura 9: Dosagens das misturas asfálticas.....	39
Figura 10: Curva de projeto – Mistura 1 – Dosagem padrão com 5% de CAP sem RAP.....	40
Figura 11: Dosagem concreto asfáltico – faixa C – DNIT (Mistura 2).....	41
Figura 12: Fluxograma dos corpos de prova da amostra sem incorporação do RAP, elaborados em laboratório.....	42
Figura 13: Fluxograma dos corpos de prova com introdução do RAP a frio, elaborados em laboratório.....	43
Figura 14: Fluxograma dos corpos de prova com introdução do RAP a quente, elaborados em laboratório.....	44
Figura 15: Pesagem e separação dos agregados das misturas asfálticas.....	44
Figura 16: Aplicação do desmoldante e balança de precisão.....	45
Figura 17: Mistura do corpo de prova sem adição do RAP.....	46
Figura 18: Mistura do corpo de prova com adição do RAP a frio e quente.....	46
Figura 19: Compactação do corpo de prova no Compactador Marshall.....	47
Figura 20: Corpos de provas e ensaio de resistência a tração por compressão diametral.....	48
Figura 21: Resultados obtidos para cada corpo de prova e suas médias sem incorporação de RAP.....	51
Figura 22: Resultados obtidos para cada corpo de prova e suas médias com incorporação de RAP a frio (com desconto na porcentagem de CAP).....	52
Figura 23: Resultados obtidos para cada corpo de prova e suas médias com incorporação de RAP a quente (com desconto na porcentagem de CAP).....	52
Figura 24: Ilustra o gráfico do comportamento das curvas dos resultados obtidos para VV.....	53
Figura 25: Ilustra o gráfico do comportamento das curvas dos resultados obtidos para RBV.....	54

Figura 26: resultados de Vazios do Agregado Mineral em função da temperatura de incorporação do RAP	55
Figura 27: Ilustra o gráfico do comportamento das curvas dos resultados obtidos para VCB.	56
Figura 28: Resultados obtidos para cada corpo de prova e suas médias a respeito das resistências à tração (σ_R).....	57
Figura 29: Resistência a tração em misturas asfálticas	57
Figura 30: Parâmetros volumétricos.....	58
Figura 31: Limites de acordo com a norma DNIT 031/2024	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Extração de betume no rotarék.	35
Quadro 2: Porcentagens dos agregados que compõem o traço utilizados nas misturas da TCPVA.	36
Quadro 3: Identificações dos Corpos de prova.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Granulometria e densidades reais dos agregados e RAP.....	36
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
Vv	Volume de Vazios
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement (Fresado Asfáltico)
VAM	Vazios do Agregado Mineral
VCB	Vazios com Betume
RBV	Relação Betume/Vazios
Gmb	Densidade Aparente da mistura
σ_R	Resistência a Tração
CP	Corpo de Prova
CNT	Confederação Nacional do Transporte

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Sigma
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	19
1.1.1	Objetivo geral.....	19
1.1.2	Objetivos específicos	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Pavimentação Asfáltica	20
2.1.1	Tipos de Pavimentos	21
2.1.2	Misturas asfálticas	22
2.1.2.1	<i>Misturas asfálticas usinadas a quente</i>	<i>23</i>
2.1.2.2	<i>Misturas asfálticas usinadas a Frio.....</i>	<i>25</i>
2.1.2.3	<i>Agregados</i>	<i>26</i>
2.1.2.4	<i>Ligante asfáltico, cimento asfáltico (CAP) ou ligante betuminoso.</i>	<i>27</i>
2.1.2.5	<i>Dosagem de misturas asfáltica</i>	<i>28</i>
2.1.2.6	<i>Agentes rejuvenescedores</i>	<i>29</i>
2.1.3	Fresagem de Pavimentos Asfálticos.....	29
2.1.4	Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)	30
2.2	Misturas Asfálticas Recicladas com RAP	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1	Materiais	34
3.2	Metodologia	34
3.2.1	Distribuição granulométrica e Densidades reais dos agregados e RAP	35
3.2.2	Curva de Viscosidade Saybolt Furol.....	36
3.2.3	Dosagem das Misturas Asfálticas	39
3.2.3.1	<i>Dosagem concreto asfáltico – faixa C – DNIT (Mistura 1).....</i>	<i>39</i>
3.2.3.2	<i>Dosagem concreto asfáltico – faixa C – DNIT (Mistura 2).....</i>	<i>40</i>
3.2.4	Produção das Misturas Asfálticas	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51

4.1	Efeito da Temperatura de incorporação do RAP	51
4.1.1	Volume de Vazios (<i>VV</i>)	53
4.1.2	Relação Betume/Vazios (<i>RBV</i>)	54
4.1.3	Vazios do Agregado Mineral (<i>VAM</i>)	55
4.1.4	Vazios com Betume (<i>VCB</i>)	55
4.1.5	Resistência à Tração (σ_R)	56
4.2	Verificação do enquadramento normativo das Misturas Asfálticas	58
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
	REFERÊNCIAS	62
	ANEXOS	65

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções sustentáveis na engenharia de pavimentos tem incentivado a adoção de técnicas que promovam a reutilização de materiais, redução de custos e preservação ambiental. Dentre essas técnicas, destaca-se o uso do material fresado de pavimentos asfálticos, também conhecido como Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), em novas misturas asfálticas. A utilização do fresado em misturas asfálticas requer um estudo criterioso de suas propriedades físicas e mecânicas, bem como da sua interação com ligantes virgens e aditivos rejuvenescedores.

A aplicação do RAP, em misturas asfálticas a quente é uma medida que vem sendo amplamente utilizada em diversos países, justamente por possuir vantagens do ponto de vista econômico, social e ambiental. A taxa de aproveitamento de RAP para essas misturas em 2020 na Alemanha foi de 84%; na Dinamarca, 85%; e atingiu 95% na Hungria (Eapa, 2021).

Segundo Bernucci - et al. (2022) o RAP, é o material resultante da fresagem de pavimentos asfálticos deteriorados. Este processo consiste na remoção parcial ou total das camadas do revestimento asfáltico por meio de fresadoras mecânicas, sendo um método comumente utilizado para intervenções de manutenção e restauração de pavimentos.

A relevância do uso de fresado em misturas asfálticas está diretamente ligada à busca por soluções sustentáveis, econômicas e eficientes para a conservação e ampliação da malha viária. Considerando que grande parte das rodovias brasileiras se encontra em condições precárias, conforme apontado pela Pesquisa CNT de Rodovias (2024), na avaliação realizada nos 111.853 quilômetros de rodovias brasileiras, verifica-se que maior parte da extensão, 75.039 quilômetros (67,0%), foi classificada como regular, ruim ou péssimo, enquanto 36.814 quilômetros (33,0%) foram classificados como ótimo ou bom.

Em 2024, a Pesquisa CNT apontou que 43,1% (48.227 km) da malha rodoviária avaliada está em boas condições, sendo 31,2% (34.874 km) classificados como ótimos e 11,9% (13.353 km) como bons. Por outro lado, 56,9% (63.626 km) necessitam de atenção, com 34,7% (38.860 km) em estado regular, 16,3% (18.200 km) como ruins e 5,9% (6.566 km) como péssimos.

Entre os principais benefícios da reutilização do fresado destacam-se a economia no consumo de agregados virgens e ligantes asfálticos, a preservação de recursos naturais, a redução no volume de resíduos descartados e a diminuição do custo final das obras. Além disso, a prática contribui para a manutenção da geometria do pavimento e da fricção superficial, melhorando a segurança e o desempenho do tráfego (Lima, 2020).

De acordo com Borges (2024), a incorporação do fresado em misturas asfálticas também apresenta desafios, como a heterogeneidade do material, a alteração nas propriedades do ligante envelhecido e a necessidade de correções granulométricas. A ausência de normativas específicas que regulem a proporção ideal e os métodos de aplicação também dificulta sua padronização em projetos de engenharia.

Segundo Centofante et al. (2018), O desempenho das misturas asfálticas contendo fresado tem sido amplamente investigado. Estudos indicam que o aumento do teor de fresado pode elevar a rigidez e resistência mecânica das misturas, ampliando sua vida útil. Entretanto, esse ganho deve ser equilibrado com a adição de ligantes rejuvenescedores para evitar efeitos indesejáveis, como a fragilidade excessiva da mistura a baixas temperaturas.

No cenário internacional, países como Estados Unidos e Alemanha utilizam amplamente o RAP em diferentes camadas de pavimento, com resultados positivos tanto na performance técnica quanto na sustentabilidade ambiental. No Brasil, embora haja avanços e experiências bem-sucedidas, ainda é necessário maior incentivo à normatização, mapeamento de resíduos e conscientização técnica para ampliar seu uso de forma padronizada e eficiente (Borges, 2024).

Assim, o presente estudo justifica-se pela necessidade de aprofundar o conhecimento técnico-científico sobre a aplicação do fresado em misturas asfálticas, visando contribuir com soluções viáveis que otimizem o desempenho estrutural dos pavimentos e promovam práticas sustentáveis dentro da engenharia.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a utilização do RAP em misturas asfálticas usinadas, por meio de estudos experimentais.

1.1.2 Objetivos específicos

- Investigar o impacto na mistura asfáltica com a introdução do RAP incorporado a frio e a quente.
- Avaliar o desempenho técnico do emprego do RAP nas misturas asfálticas.
- Comparar os resultados obtidos neste estudo com os trabalhos anteriores disponíveis na literatura.

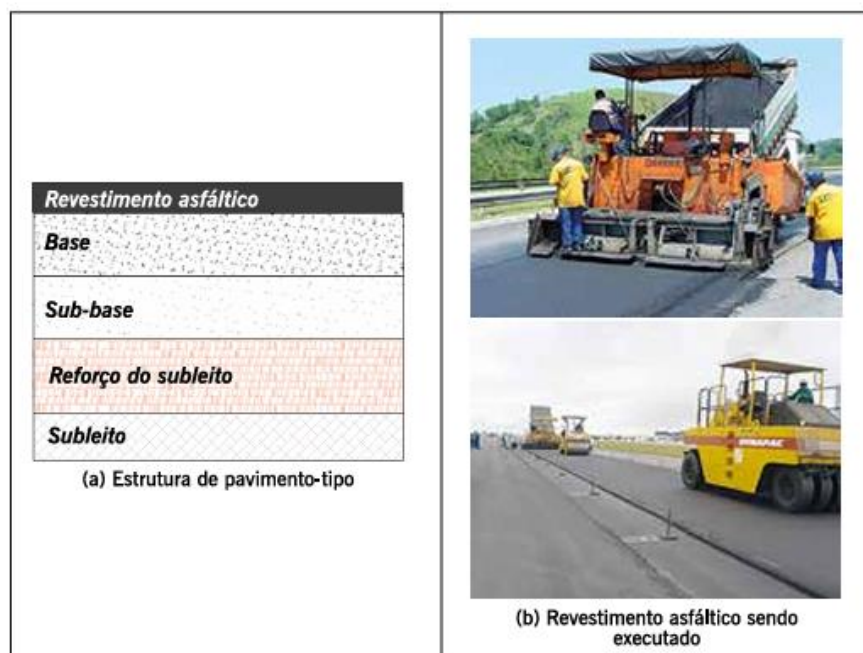
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, serão apresentados os dados e fundamentos utilizados ou que reforçam o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Pavimentação Asfáltica

A pavimentação asfáltica funciona como um sistema em camadas, onde cada parte tem sua importância para suportar o peso dos veículos e aguentar as variações do clima. Essas camadas, sobrepostas umas às outras, ajudam a manter a via segura, confortável e mais durável, tanto para quem constrói quanto para quem utiliza. No caso dos pavimentos flexíveis, as partes principais costumam ser: o revestimento asfáltico, a base, a sub-base e o reforço do subleito (Bernucci et al., 2022). A camada superior, ou revestimento, é responsável por suportar diretamente os esforços induzidos pelos veículos e proporcionar impermeabilização ao sistema viário (Centofante et al., 2018). De acordo com Bernucci et al. (2022), o pavimento é composto por camadas de diferentes materiais e espessuras, projetadas tecnicamente para resistir às ações mecânicas do tráfego e às variações climáticas. Na Figura 1 podemos ver as camadas do pavimento asfáltico.

Figura 1: Pavimento asfáltico.

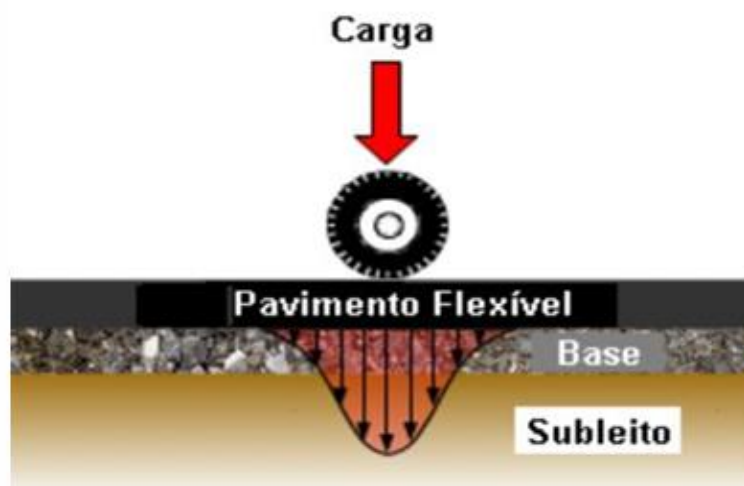


Fonte: Bernucci et al (2022).

2.1.1 Tipos de Pavimentos

De modo geral, os pavimentos podem ser classificados em três categorias principais: flexíveis, semirrígidos e rígidos. O pavimento flexível é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas (DNIT, 2006). Segundo Balbo (2007) o termo flexível refere-se a comportamento. Um pavimento semirrígido, à medida que sua camada cimentada degrada, vai, pouco a pouco, apresentando comportamento flexível em termos de distribuição de tensões. Na Figura 2 podemos ver o comportamento do pavimento flexível sobre carga.

Figura 2: Carga no pavimento flexível.

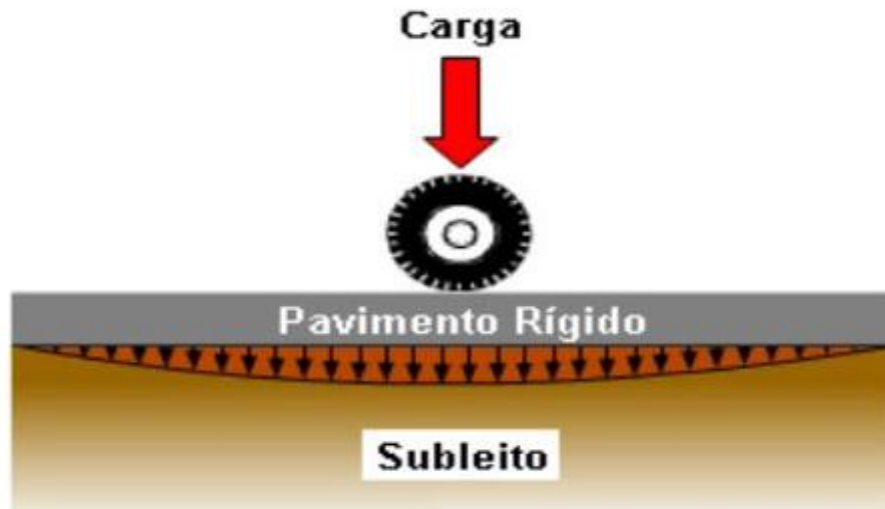


Fonte: Bernucci et al (2010).

O pavimento rígido é aquele em que o revestimento possui elevada rigidez em relação às camadas inferiores, sendo capaz de absorver uma grande parcela dos esforços horizontais solicitantes. Como resultado, as pressões verticais transmitidas ao solo de fundação são significativamente aliviadas e distribuídas de forma mais uniforme (Balbo, 2007). Segundo DNIT (2006) o pavimento rígido é aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado.

Conforme Bernucci et al. (2022) pavimentos rígidos são formados através de uma mistura de agregados, areia, cimento e água, que é capaz de ser armada com barras metálicas. Esse tipo de pavimento, pode se romper sob os esforços de tração e flexão quando estão sujeitos a deformações. Na Figura 3 podemos ver o comportamento do pavimento rígido sobre carga.

Figura 3: Carga no pavimento rígido.



Fonte: BERNUCCI et al (2010).

O pavimento semirrígido caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como por exemplo, por uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica (DNIT, 2006). Para Balbo (2007) pavimento semirrígido é composto por revestimento asfáltico com base ou sub-base em material tratado com cimento de elevada rigidez, excluídos quaisquer tipos de concreto.

2.1.2 Misturas asfálticas

Segundo Bernucci et al. (2022) as misturas asfálticas podem ser classificadas conforme o processo de produção (a quente, morna ou a frio), o tipo de ligante, o teor de betume e a distribuição granulométrica dos agregados. Essas misturas têm como finalidade proporcionar resistência estrutural ao pavimento e conforto aos usuários, sendo avaliadas por propriedades mecânicas como resistência à tração, estabilidade, módulo de resiliência, resistência à fadiga e à deformação permanente.

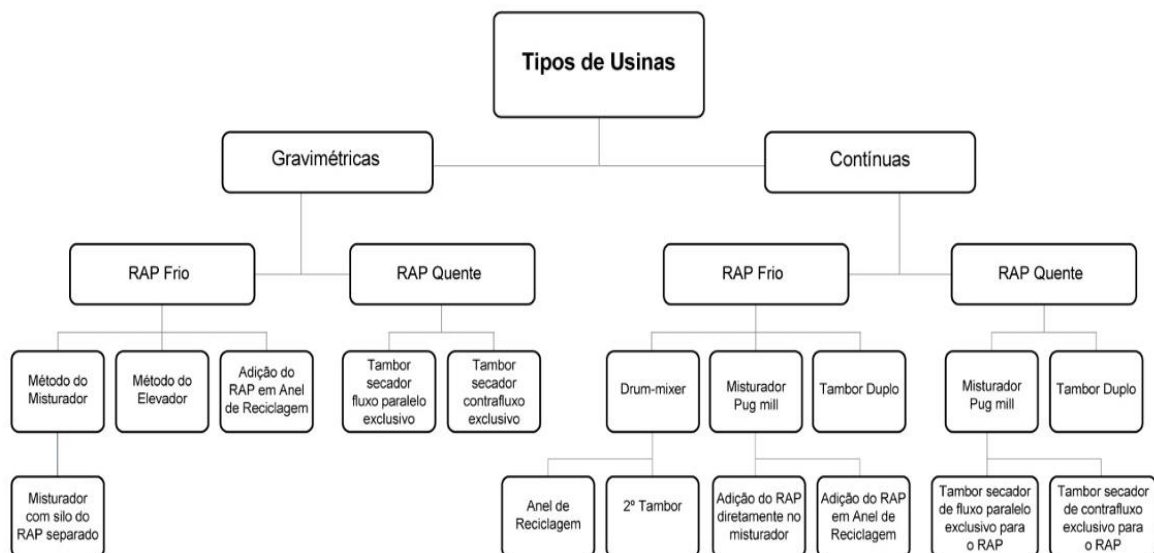
Os agregados, por exemplo, são naturalmente os principais compostos da mistura asfáltica, influenciando diretamente em sua resistência mecânica e estabilidade. Já o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) atua como ligante betuminoso, promissor da coesão e flexibilidade entre as partículas (Bernucci, 2010).

Segundo Cunha (2010) o desempenho dos pavimentos flexíveis sofre influência direta das variações de temperatura, fator que afeta significativamente a resistência das misturas betuminosas. Essas misturas, por sua natureza, apresentam comportamento viscoelástico.

Contudo, em temperaturas elevadas, tendem a se comportar de forma mais viscosa, o que resulta em maiores deformações e menor rigidez. Em contrapartida, quando expostas a baixas temperaturas, assumem um comportamento predominantemente elástico, caracterizado por deformações reduzidas e maior rigidez.

Com a utilização do RAP, onde é material proveniente da fresagem de pavimentos asfálticos, composto principalmente por agregados revestidos com ligante asfáltico envelhecido. Ele é reutilizado como matéria-prima na produção de novas misturas asfálticas, sendo uma alternativa sustentável que reduz o consumo de materiais virgens, minimiza resíduos de obra e mantém boas propriedades mecânicas, desde que bem dosado e processado (Otaviano et al., 2023). Em seguida a Figura 4 apresenta o fluxograma com os tipos de usinas utilizadas para misturas asfálticas recicladas:

Figura 4: Fluxograma com os tipos de usinas utilizadas para misturas asfálticas recicladas.



Fonte: NORMA DNIT 033/2021 – ES.

2.1.2.1 Misturas asfálticas usinadas a quente

A reciclagem a quente é o processo em que parte ou todo o revestimento asfáltico é retirado e reduzido a dimensões apropriadas, onde em seguida é misturado a quente, podendo ser realizado no próprio local ou em usina estacionária. Este processo pode ainda incluir a adição de novos agregados, cimento asfáltico e agente rejuvenescedor (Fonseca et al., 2014)

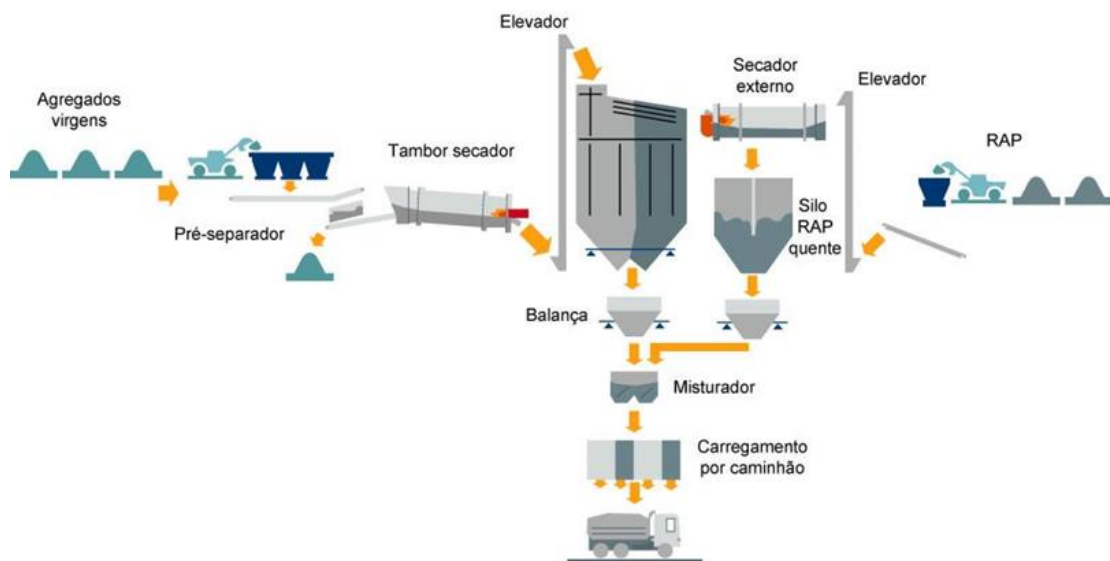
Segundo o DNIT (2006) a produção de uma mistura reciclada a quente exige algumas modificações no processamento das usinas convencionais. O principal objetivo dessas

modificações é aquecer e secar o revestimento asfáltico removido sem expô-lo diretamente à chama do secador. A exposição direta à chama pode produzir poluição do ar, bem como um endurecimento adicional do asfalto remanescente no revestimento removido.

De acordo com Bernucci et al. (2022) as misturas a quente e as mornas distinguem-se em vários tipos, de acordo com o padrão granulométrico empregado e as exigências de características mecânicas, em função da aplicação a que se destinam. A mistura asfáltica usinada mais empregada no Brasil é o concreto asfáltico (CA), também denominado concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Trata-se do produto da mistura convenientemente proporcionada de agregados de vários tamanhos, filler e cimento asfáltico, podendo ter ainda alguns aditivos, aquecidos em temperaturas previamente escolhidas, em função da característica viscosidade-temperatura do ligante.

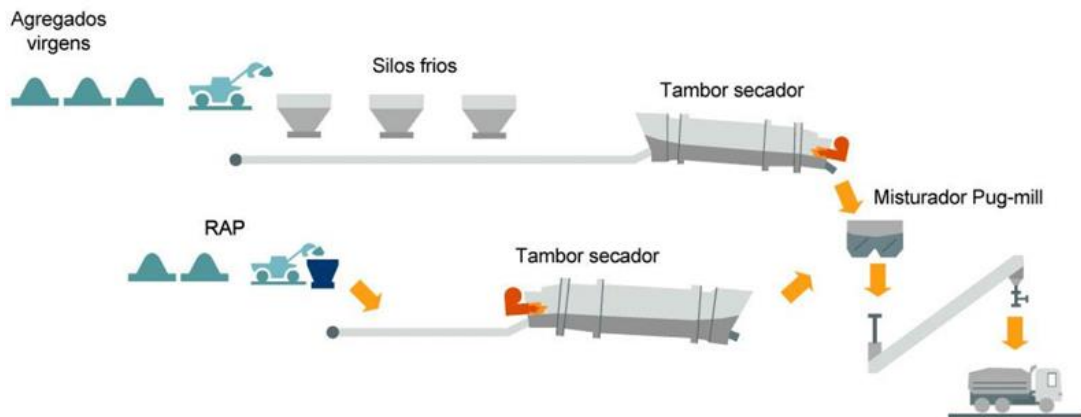
Na reciclagem a quente, a prática de adicionar um certo percentual de mistura asfáltica antiga fresada (RAP) em misturas asfálticas novas tem aumentado bastante porque representa economia de recursos naturais e diminuição de custos. Quanto mais alta a porcentagem de RAP adicionado, maiores as temperaturas para os agregados virgens, o que gera maior consumo de energia e aumento das emissões (Bernucci et al., 2022). A figura 5 apresenta o RAP quente em usinas gravimétricas com tambor secador de fluxo paralelo exclusivo.

Figura 5: RAP quente em usinas gravimétricas com tambor secador de fluxo paralelo exclusivo.



Fonte: NORMA DNIT 033/2021 – ES.

Figura 6: RAP quente em usinas contínuas com tambor duplo.



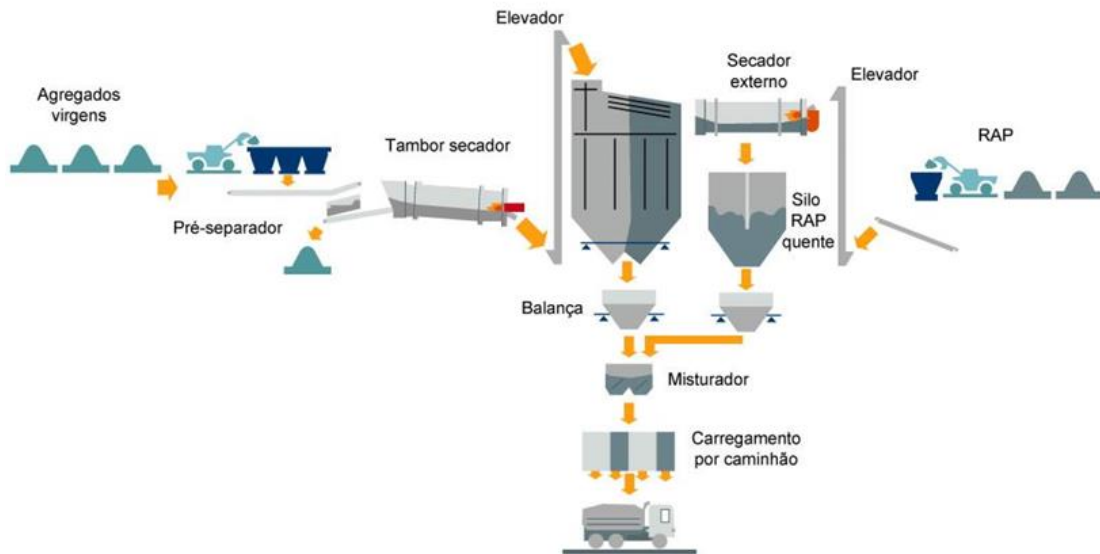
Fonte: NORMA DNIT 033/2021 – ES.

2.1.2.2 Misturas asfálticas usinadas a Frio

Na reciclagem a frio o material removido do pavimento pode ser combinado com emulsão asfáltica, agente rejuvenescedor e estabilizantes químicos. Porém, diferentemente da mistura asfáltica reciclada a quente, este processo é realizado a temperatura ambiente (Fonseca et al., 2014).

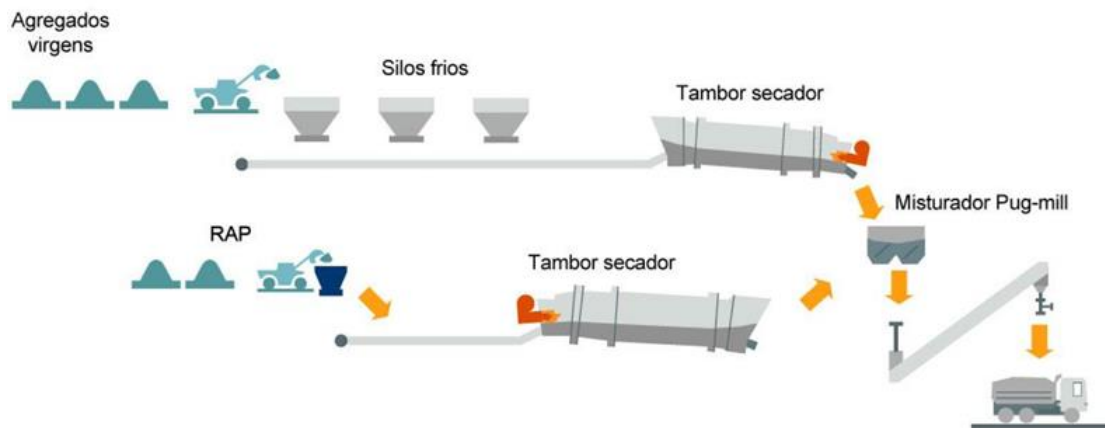
De acordo com DNIT (2006) a reciclagem a frio é um processo no qual toda a estrutura do pavimento, ou parte dela, é removida e reduzida a dimensões apropriadas para depois ser misturada a frio no próprio local ou em usina. Poderão ser adicionados materiais betuminosos (emulsão asfáltica), agregados, agentes rejuvenescedores ou estabilizantes químicos. O processo inclui a homogeneização dos agregados com o ligante, podendo ser executado em usina apropriada ou diretamente em campo, com posterior transporte e aplicação por vibro acabadora ou motoniveladora. As Figuras 6 e 8 apresentam o RAP frio em usinas gravimétricas (adição de RAP em um anel de reciclagem) e o RAP frio em Usinas Contínuas com tambor duplo, respectivamente.

Figura 7: RAP frio em usinas gravimétricas - adição de RAP em um anel de reciclagem.



Fonte: NORMA DNIT 033/2021 – ES.

Figura 8: RAP frio em usinas gravimétricas com tambor duplo.



Fonte: NORMA DNIT 033/2021 – ES.

2.1.2.3 Agregados

Conforme Balbo (2007) os agregados podem ser entendidos como conjuntos de grãos minerais, dentro de determinados limites de dimensões, naturais ou artificiais, britados ou não, utilizados na construção civil, notavelmente concretos asfálticos e de cimento Portland, misturas estabilizadas com ligantes etc. No ramo da construção pesada de vias de transporte,

são de notável aplicação na fabricação de diversas camadas que compõem estruturas de pavimentos.

De acordo com Bernucci et al. (2022), os agregados desempenham papel fundamental nas misturas asfálticas, representando entre 90% e 95% de sua massa total. São eles os responsáveis por garantir ao pavimento qualidades como resistência, estabilidade e durabilidade. No entanto, a escolha adequada desses materiais não depende apenas de suas propriedades físicas visíveis. O desempenho em campo também está diretamente relacionado às características geológicas da rocha de origem. Por isso, é essencial considerar aspectos como o tipo de rocha, sua composição mineralógica e química, a granulometria, o grau de alteração natural, além da susceptibilidade à abrasão, fratura ou degradação provocada pelo tráfego. Outro ponto determinante é a capacidade da superfície do agregado em aderir ao ligante asfáltico, o que influencia diretamente na coesão e durabilidade da mistura.

2.1.2.4 Ligante asfáltico, cimento asfáltico (CAP) ou ligante betuminoso.

Para Bernucci et al. (2022) o ligante asfáltico é a matéria-prima de asfaltos diluídos, emulsões asfálticas, asfaltos modificados, asfalto espuma e asfaltos soprados (industriais), sendo que este conjunto representa cerca de 40% do consumo, com os demais 60% usados nas aplicações a quente nas misturas denominadas de concreto asfáltico. O ligante é um material semissólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas, e que se enquadra em limites de consistência para determinadas temperaturas estabelecidas em especificações que regulam a comercialização e a seleção para as obras.

Segundo Balbo (2007) betumes podem ser definidos da seguinte maneira: são substâncias compostas por hidrocarbonetos pesados, com propriedade ligantes, inflamáveis, de elevada viscosidade em temperatura ambiente, e que ocorrem na natureza ou são obtidos por fabricação, partir da destilação de petróleo, de carvão, de madeira ou de resinas. As misturas betuminosas tradicionais são fabricadas a quente em centrais especificamente concebidas para o efeito. São constituídas por agregados e betume, os quais são aquecidos com o intuito de diminuir a viscosidade do betume, e assim obter a consistência que permita o fabrico da mistura (Cunha, 2010).

O CAP é obtido a partir de processos de refinamento do petróleo cru, para as finalidades específicas de pavimentação, além de outras aplicações. São materiais que possuem grande quantidade de betume (hidrocarbonetos não voláteis pesados). Como material ligante ou

aglutinante, possui geralmente boa aderência aos agregados (exceção feita a minerais argilosos, moscovita e alguns quartzos), além de apresentar propriedades impermeabilizantes, o que torna seu uso bastante popular em engenharia civil sob formas diversas. É um material termoplástico, de comportamento reológico complexo e dependente da temperatura, que, com o intemperismo, se altera, perdendo suas propriedades iniciais, tornando-se mais viscoso e frágil (Baldo, 2007).

2.1.2.5 Dosagem de misturas asfáltica

A dosagem de misturas asfálticas consiste na determinação das proporções ideais entre agregados, ligantes asfálticos e ar incorporado, de forma a garantir que a mistura apresente desempenho mecânico, estabilidade volumétrica e durabilidade adequados às condições de tráfego e clima da via onde será aplicada. O processo de dosagem busca atender critérios técnicos que envolvem características como massa específica, teor de vazios, grau de compactação e resistência à deformação permanente (Bernucci et al., 2022).

Com o avanço das práticas sustentáveis, as misturas recicladas vêm ganhando destaque. No caso das misturas recicladas a quente e mornas, utiliza-se o material fresado de pavimentos antigos (RAP), que é combinado com ligante virgem e, muitas vezes, com aditivos rejuvenescedores. Já nas misturas recicladas a frio, o RAP é misturado com emulsão ou cimento, podendo ser produzido in situ ou em usinas móveis. Nesses casos, a dosagem visa equilibrar a trabalhabilidade da mistura, a cura e o desempenho mecânico (Bernucci et al., 2022).

A DNIT (2024), recomenda limites práticos para o uso de RAP, geralmente entre 10% e 30% em misturas a quente. O desempenho é afetado diretamente pela quantidade de RAP: maiores teores tendem a aumentar a rigidez e a resistência à deformação permanente, mas também podem reduzir a trabalhabilidade e adesividade da mistura.

Antes da definição do traço, é fundamental caracterizar o RAP quanto à granulometria, teor de ligante residual, massa específica e grau de envelhecimento do ligante. Segundo Centofante et al. (2018), o teor de ligante envelhecido presente no RAP pode atingir cerca de 6,76%, o que permite reduzir consideravelmente a adição de CAP novo nas misturas.

2.1.2.6 Agentes rejuvenescedores

Os agentes regeneradores, recicladores ou rejuvenescedores são hidrocarbonetos especialmente refinados para possuir em sua composição química uma alta fração de maltenos, que é a fração que se perde no processo de envelhecimento do asfalto. O agente rejuvenescedor ocasiona um novo equilíbrio às frações maltenos, já que introduz os solventes de peptização em um alto teor, levando o asfalto a readquirir as propriedades de um novo e durável cimento asfáltico (DNIT, 2006).

Segundo Borges (2024) os agentes rejuvenescedores agem restaurando a ductilidade e a consistência por meio da inserção de compostos aromáticos, sendo classificados conforme a técnica de aplicação: a quente (AR – Aditivo Asfáltico de Reciclagem) e a frio (ARE – Agente de Reciclagem Emulsionado).

Para determinar as percentagens de CAP adicional e/ou agente regenerador, devem ser realizadas misturas destes materiais em diversas proporções, com o CAP obtido no ensaio de recuperação do betume, e escolhidos os valores, em tipos e quantidades (DNIT, 2006).

A escolha do tipo de rejuvenescedor deve considerar o nível de envelhecimento do ligante e os requisitos de desempenho da mistura final. Ensaio laboratoriais de penetração, viscosidade e reologia são essenciais para definir a dosagem apropriada e garantir que a mistura reciclada atenda aos critérios técnicos e ambientais do projeto (BORGES, 2024).

2.1.3 Fresagem de Pavimentos Asfálticos

A fresagem é uma técnica construtiva utilizada na manutenção e restauração de pavimentos asfálticos, caracterizada pela remoção de uma ou mais camadas do revestimento. Essa operação permite restaurar o perfil do pavimento, corrigir defeitos estruturais e funcionais, bem como preparar a via para receber novas camadas asfálticas ou para reaproveitamento do material removido, conhecido como RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) (DNIT, 2011).

Segundo a norma DNIT 159/2011-ES, a fresagem pode ser aplicada em diversas situações, como na regularização de irregularidades do pavimento, na remoção de camadas deterioradas, na correção da inclinação transversal, ou ainda na melhoria do coeficiente de atrito em trechos com alto índice de derrapagem. Trata-se de um processo que agrega segurança e qualidade à obra, permitindo a reabilitação da via sem a necessidade de reconstrução total. A Figura 4 representa a máquina fresadora em serviço de fresagem em uma rodovia e o recolhimento do material fresado.

Figura 4: Processo de fresagem e recolhimento do material.



Fonte: Bernucci et al (2022).

A técnica se divide em diferentes modalidades, conforme o objetivo da intervenção e a área afetada. A fresagem contínua abrange toda a largura da pista, sendo utilizada para grandes volumes e geralmente executada com fresadoras de grande porte. Já a fresagem descontínua é aplicada em áreas pontuais, com equipamentos menores, sendo comum em reparos localizados. Há ainda a fresagem de cunha, utilizada nas bordas da pista para garantir a ancoragem da nova camada, e a fresagem de arremate, voltada para ajustes próximos a elementos como tampas de bueiros ou bocas de lobo (Bernucci et al., 2022).

2.1.4 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

O material fresado proveniente da remoção de camadas asfálticas é tecnicamente denominado RAP (Reclaimed Asphalt Pavement). Ele é composto por agregados minerais recobertos com ligante asfáltico envelhecido, sendo um resíduo valioso que pode ser reutilizado em novas misturas asfálticas ou em camadas de base e sub-base. Seu uso permite economia de materiais virgens, redução no consumo de ligante asfáltico novo e diminuição da geração de resíduos sólidos (Copeland, 2011). Na Figura 5 podemos ver o RAP.

Figura 5: Material RAP.



Fonte: Copeland (2011).

Segundo Centofante et al. (2018) entre as vantagens técnicas do RAP estão a presença de um ligante envelhecido, que contribui para a economia de CAP novo, e a possibilidade de obter boas propriedades mecânicas quando bem dosado. Por outro lado, a principal preocupação está relacionada ao envelhecimento excessivo desse ligante, que pode tornar a mistura final mais rígida, menos trabalhável e suscetível a trincas por fadiga ou ação da água.

A crescente valorização do RAP em países como Estados Unidos, Alemanha e Japão reforça seu potencial de uso. Nesses locais, são comuns misturas com até 30% de RAP, com desempenho similar ao de misturas convencionais. No entanto, para garantir sua eficácia, é essencial seguir boas práticas de projeto e produção, como a adequada compatibilização entre o ligante do RAP e o novo ligante, o uso de rejuvenescedores e o controle rigoroso de temperatura durante a usinagem (Copeland, 2011).

A utilização do RAP insere-se dentro dos princípios da economia circular, ao promover o reaproveitamento de recursos e a minimização de impactos ambientais. Estudos realizados no Brasil apontam que o país gera, em média, 2,1 milhões de toneladas de RAP por ano (Lopes et al., 2024).

2.2 Misturas Asfálticas Recicladas com RAP

Segundo Centofante et al. (2018) as misturas asfálticas recicladas com material fresado (RAP) consistem na combinação de agregados virgens, ligante asfáltico novo e parte do

pavimento removido por fresagem. Essa técnica é amplamente empregada na reabilitação de vias como uma alternativa econômica, técnica e ambientalmente viável. A incorporação do RAP pode ser feita em diferentes proporções, normalmente entre 10% e 30%, sem prejuízo significativo às propriedades da mistura, quando há controle adequado dos materiais e da dosagem.

De acordo com Lopes et al. (2023) as misturas recicladas podem ser produzidas a quente, a frio ou morna. A reciclagem a quente, realizada em usinas, é a mais comum e permite uma melhor ativação do ligante asfáltico envelhecido presente no RAP, além de proporcionar um revestimento final com desempenho satisfatório em termos de resistência, durabilidade e impermeabilidade.

O uso mais comum do material fresado ocorre na produção de novas misturas asfálticas, em especial as misturas recicladas a quente (MARQ). Nessa aplicação, o RAP é combinado com agregados virgens e ligante asfáltico novo ou rejuvenescedor, de forma a restaurar a plasticidade e aderência da mistura original (Lima, 2020).

A produção das misturas pode ocorrer em laboratório, como forma de projeto e avaliação inicial, ou em usina, onde se verifica a viabilidade prática do traço. Comparações entre os dois ambientes mostram que a mistura em campo tende a apresentar maior rigidez devido ao tempo e temperatura do processo de usinagem, exigindo ajustes finos para garantir compatibilidade com os resultados laboratoriais (Lopes et al., 2023).

2.3 Avaliação Ambiental e Sustentabilidade

O uso de material fresado em misturas asfálticas representa uma solução sustentável para a engenharia rodoviária, alinhando-se aos princípios da economia circular, da redução da exploração de recursos naturais e da mitigação dos impactos ambientais. A avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem sido uma ferramenta amplamente utilizada para mensurar os efeitos ambientais associados à produção e ao uso de misturas recicladas com RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), considerando desde a extração de matérias-primas até a disposição final do pavimento (Canchanya, 2017).

Ao reutilizar parte da estrutura do pavimento removido, evita-se o descarte em aterros e a extração de grandes volumes de agregados virgens. Além disso, há redução expressiva na necessidade de ligante asfáltico novo, já que o RAP contém betume residual ainda funcional (Copeland, 2011).

A sustentabilidade também se manifesta nos aspectos energéticos e operacionais. Nos Estados Unidos, estima-se que o uso de RAP tenha economizado anualmente milhões de toneladas de agregados e betume, com reflexo direto na redução de emissões de CO₂ e no consumo de água e combustível (Lopes et al., 2024).

Pesquisa CNT de Rodovias (2024) destaca que o país possui mais de 2,1 milhões de toneladas de RAP estocadas por ano, mas a taxa média de reaproveitamento ainda gira em torno de 15%, sendo necessária a ampliação do uso efetivo em novas misturas asfálticas.

Do ponto de vista prático, a incorporação de RAP já é realidade em obras de reabilitação, recapeamento e reforço estrutural de rodovias federais e estaduais. A técnica tem sido aplicada com sucesso em diferentes condições climáticas e geográficas, tanto em ambientes urbanos quanto rurais, comprovando sua viabilidade operacional e sua contribuição para o ciclo de vida estendido do pavimento.

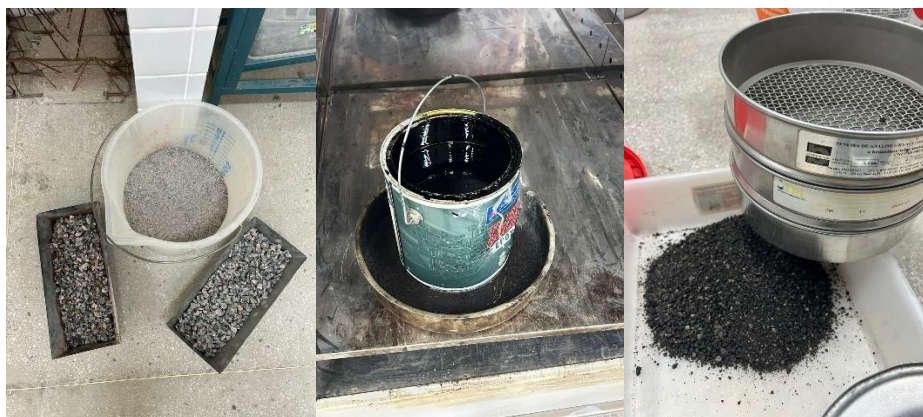
Portanto, mais do que uma solução técnica, o uso do material fresado em misturas asfálticas representa uma estratégia integrada de engenharia, economia e meio ambiente, sendo considerada uma prática essencial para pavimentações mais sustentáveis e eficientes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Os insumos utilizados na preparação das misturas asfálticas são os agregados e ligantes asfálticos, parte foram fornecidos pela empresa TCPAV, situada no município de Macaíba/RN, a cerca de 30 km da capital Natal. O ligante aplicado foi o CAP 50/70 obtido diretamente do estoque da usina responsável pela produção do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). O material fresado (RAP), oriundo da remoção de revestimento asfáltico de um trecho da rodovia BR-304 fornecido pela TCPAV. Além do fornecimento dos materiais, o laboratório da empresa (TCPAV) também disponibilizou dados técnicos relevantes sobre os componentes. Os agregados utilizados foram obtidos na mineração Caraúbas LTDA. Sendo eles a brita 5/8 (com granulometria de 16 mm), a brita 0 (com tamanho de 12 mm), além do pó de pedra. Como mostra a Figura 6 a seguir:

Figura 6: Agregados, CAP 50/70 e RAP.



Fonte: Autoria própria (2025).

3.2 Metodologia

O teor de ligante asfáltico presente no RAP foi determinado por meio do ensaio de extração de betume realizado no equipamento Rotarex (Quadro 1). Para todos os agregados, foram obtidas as curvas granulométricas e as respectivas densidades reais, parâmetros fundamentais para a caracterização e posterior dosagem das misturas.

Com relação ao ligante asfáltico, foi fornecido o resultado do ensaio de viscosidade Saybolt Furol, o qual possibilitou avaliar o comportamento reológico do CAP 50/70 e estabelecer as faixas de temperatura ideais para o preparo das misturas asfálticas.

Quadro 1: Extração de betume no rotaréx.

	Extração de Betume no Rotarex
Material	RAP
Origem	BR-304
Resultado	4,8% de CAP
Laboratorista	João Carlos - TCPAV
Data	16 de Dez. 2024

Fonte: TCPAV (2025).

3.2.1 Distribuição granulométrica e Densidades reais dos agregados e RAP

A caracterização dos agregados empregados nas misturas asfálticas contempla a análise granulométrica, realizada por peneiramento, e a determinação da densidade real, obtida por meio do método do picnômetro (DNIT 086/2010 – ME e DNIT 146/2018 – ME). Esses parâmetros são fundamentais para garantir a homogeneidade da mistura e orientar corretamente sua dosagem. A análise granulométrica verifica se os materiais atendem aos critérios estabelecidos pelas normas técnicas, enquanto a densidade real é indispensável nos cálculos de volume da composição. A tabela 1 apresenta os resultados obtidos para a distribuição granulométrica e a densidade real de cada agregado utilizado, incluindo o material fresado (RAP). E o Quadro 2, as porcentagens dos agregados que compõem o traço utilizado pela TCPAV.

Tabela 1: Granulometria e densidades reais dos agregados e RAP.

PENEIRAS		AGREGADOS			
Pol	mm	Brita 5/8" (16mm)	Brita 1/2" (12mm)	Pó-de-pedra	RAP
		% Passante	% Passante	% Passante	% Passante
1.1/2"	38,1	100	100	100	100
1"	25,4	100	100	100	100
3/4"	19,1	100	100	100	100
5/8"	15,9	99,6	100	100	100
1/2"	12,5	95,9	96,8	100	97,81
3/8"	9,5	85,4	80,4	100	94,84
N.º 4	4,76	14,5	13,8	100	84,14
N.º 10	2	2,6	1,3	70,4	63,3
N.º 40	0,42	2,2	0,9	35,9	37,57
N.º 80	0,18	1,9	0,6	17,1	21,15
N.º 200	0,074	1,6	0,3	5,6	9,3
Fundo		0,0	0,0	0,0	0,0
DENSIDADE REAL		2,477	2,658	2,657	2,431

Fonte: Adaptado de Araújo (2025).

Quadro 2: Porcentagens dos agregados que compõem o traço utilizados nas misturas da TCPVA.

AGREGADOS QUE COMPOEM O TRAÇO	% NA MISTURA
Brita 19mm	0,0%
Brita 19-12mm	0,0%
Brita 16mm	16,5%
Brita 12mm	21,8%
Pó de Pedra	49,1%
RAP	12,6%
Filler	0,0%
TOTAL	100,0%

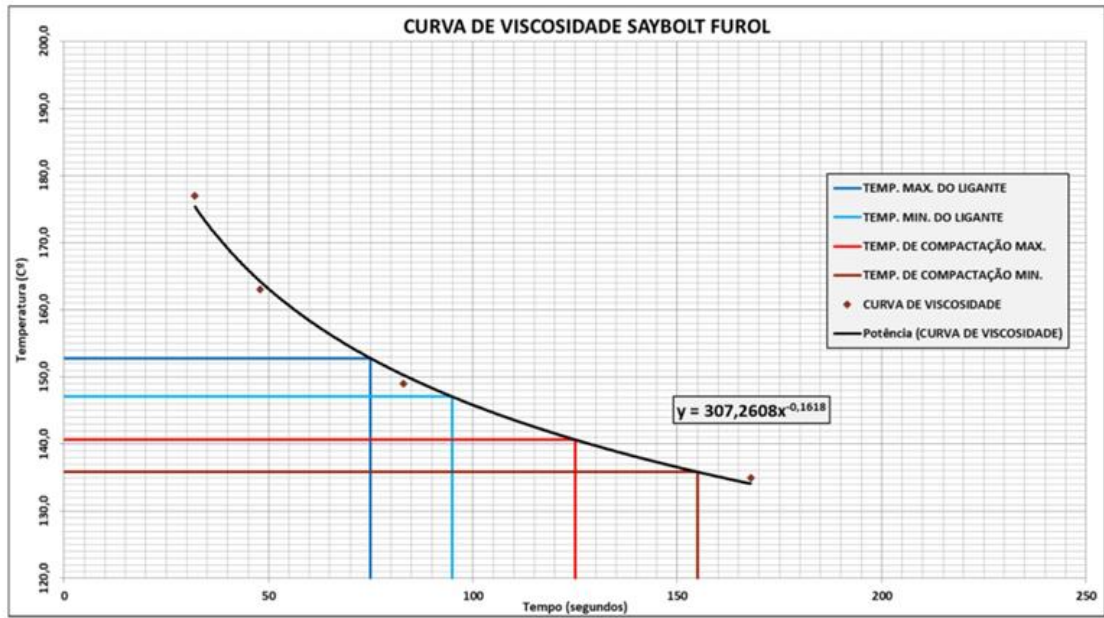
Fonte: TCPAV (2025).

3.2.2 Curva de Viscosidade Saybolt Furol

Para análise do desempenho do CAP 50/70, foi traçada a curva de viscosidade Saybolt Furol, a qual foi fornecida pela TCPAV, permitindo avaliar o comportamento do material em diferentes faixas de temperatura. Essas informações são fundamentais para definir as temperaturas ideais de usinagem e compactação, garantindo boa trabalhabilidade da mistura e adesão eficiente entre os agregados e ligante. Além disso, a curva de viscosidade estabelece os limites máximos e mínimos toleráveis para a temperatura do ligante, e da compactação durante a mistura. A Figura 7 exibe a Curva de Viscosidade Saybolt Furol, que demonstra a relação entre a temperatura e a viscosidade do ligante asfáltico. Essa representação gráfica possibilita

uma avaliação mais precisa do comportamento do CAP 50/70 ao decorrer do tempo, sendo essencial para determinar as condições ideais de usinagem e compactação na produção da mistura asfáltica.

Figura 7: Curva de Viscosidade Saybolt Furol – CAP 50/70.



Fonte: TCPAV (2025).

Inicialmente foram produzidos 9 corpos de provas, buscando reproduzir a dosagem utilizada pela TCPAV e estudos feitos anteriormente. Para a produção dos corpos de prova levou-se em consideração o teor de 5% de ligante adotado pela TCPAV e outras pesquisas como o de Araújo (2025).

Na qual três dos corpos de prova composto com 5% de ligante, RAP (como agregado miúdo) e incrementado a frio. Vale destacar que foi feito o desconto no teor de CAP das misturas considerando o teor de CAP presente no material fresado. Além desses, outros três corpos de prova com os mesmos materiais, o que difere é que o RAP foi incrementado a quente. Na figura 8 segue o fluxograma com as dosagens das Misturas Asfálticas que foram avaliadas.

Figura 8: Fluxograma das Misturas Asfálticas.



Fonte: Autoria própria (2025).

Foi realizada a identificação individual de cada corpo de prova, garantindo a correta vinculação entre os resultados dos ensaios, de acordo com as características de dosagem e o método de incorporação do RAP. O Quadro 3 apresenta a identificação dos corpos de prova.

Quadro 3: Identificações dos Corpos de prova

Corpo de prova	Descrição
CP1	Dosagem Padrão com 5% de CAP (sem RAP)
CP2	Dosagem Padrão com 5% de CAP (sem RAP)
CP3	Dosagem Padrão com 5% de CAP (sem RAP)
CP4	Dosagem com 5% de CAP (RAP inc. a frio, com desconto de %CAP)
CP5	Dosagem com 5% de CAP (RAP inc. a frio, com desconto de %CAP)
CP6	Dosagem com 5% de CAP (RAP inc. a frio, com desconto de %CAP)
CP7	Dosagem com 5% de CAP (RAP inc. a quente, com desconto de %CAP)
CP8	Dosagem com 5% de CAP (RAP inc. a quente, com desconto de %CAP)
CP9	Dosagem com 5% de CAP (RAP inc. a quente, com desconto de %CAP)

Fonte: Autoria própria (2025).

Assim, foi possível obter um conjunto de amostras representativas para cada condição experimental, viabilizando a análise comparativa entre os diferentes teores de RAP, os efeitos associados ao método de incorporação e a avaliação da influência da temperatura de incorporação do fresado na mistura asfáltica.

3.2.3 Dosagem das Misturas Asfálticas

Buscou-se seguir os limites estabelecidos pela Faixa-C do DNIT e pela Faixa de Trabalho Interna, garantindo a adequação das misturas aos padrões normativos. A Figura 9 ilustra as porcentagens dos agregados e do RAP para as misturas asfálticas desenvolvidas.

Figura 9: Dosagens das misturas asfálticas.

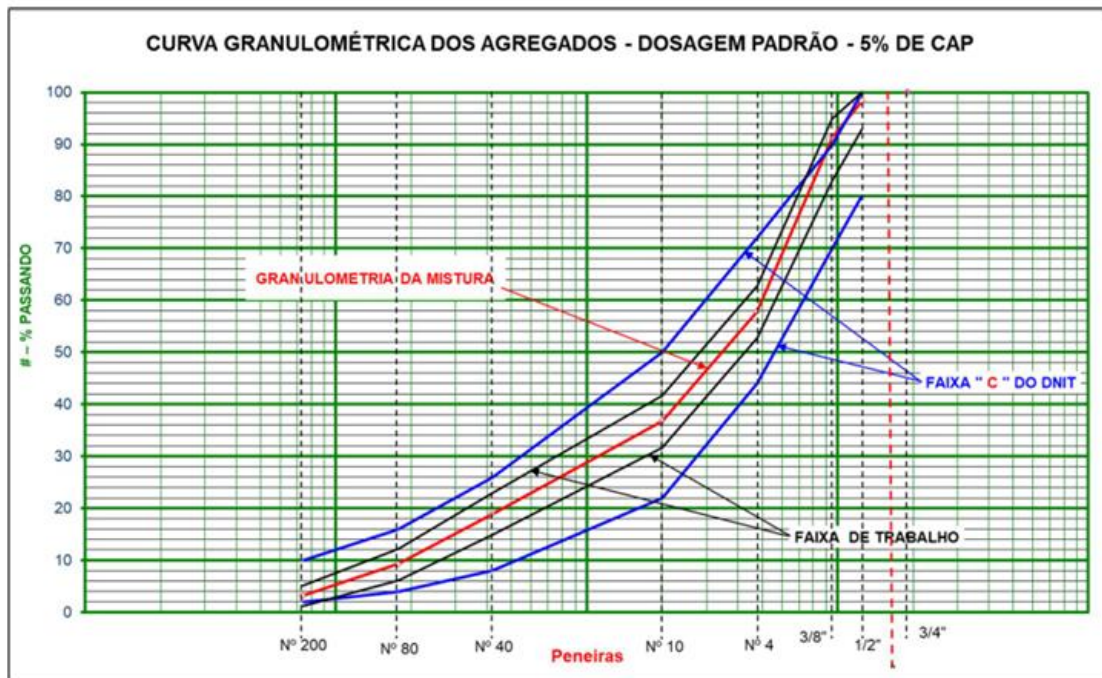
Misturas	Dosagem					TOTAL
	CAP 50/70	Brita 16mm	Brita 12mm	Pó de pedra	RAP	
M.1	5,00%	17,20%	29,45%	48,35%	-	100,00%
M.2	5,00%	15,67%	20,67%	46,66%	12%	100,00%

Fonte: Autoria própria (2025).

3.2.3.1 Dosagem concreto asfáltico – faixa C – DNIT (Mistura 1)

A dosagem padrão adotada pela usina para misturas asfálticas sem incorporação de fresado apresenta um teor de CAP de 5,0%, definido com base em critérios volumétricos e mecânicos usuais para misturas convencionais de CBUQ da própria usina. A Figura 10, apresenta-se a curva de projeto da Mistura 1.

Figura 10: Curva de projeto – Mistura 1 – Dosagem padrão com 5% de CAP sem RAP.

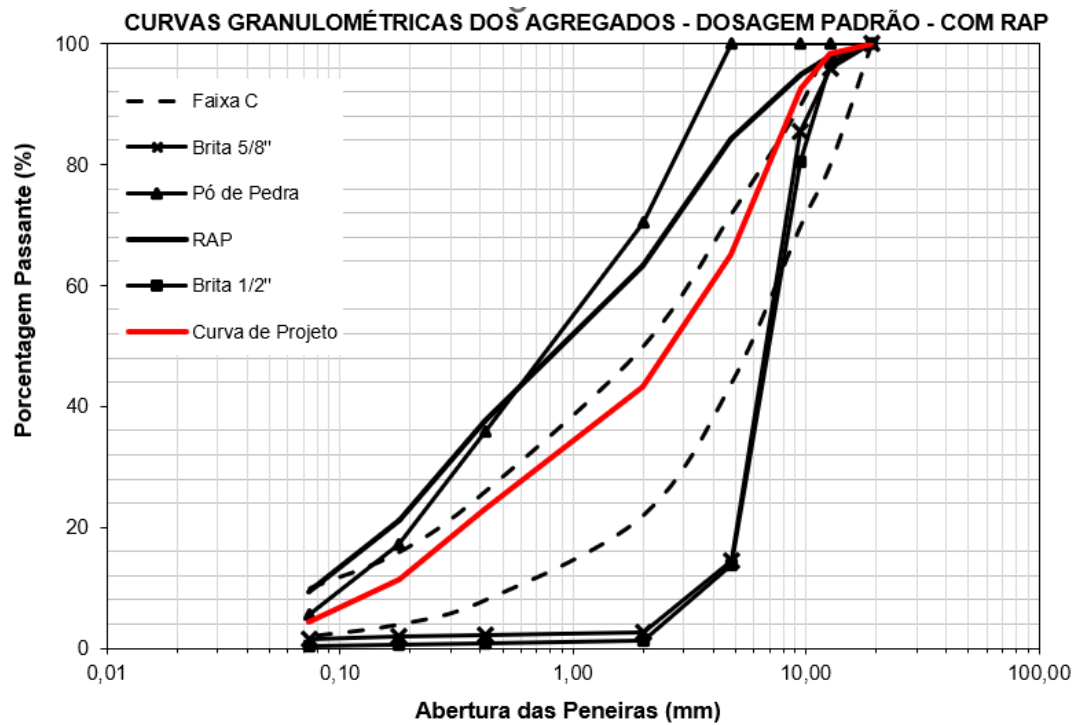


Fonte: Araújo (2025).

3.2.3.2 Dosagem concreto asfáltico – faixa C – DNIT (Mistura 2)

Para as misturas em que houve o desconto do CAP contido no RAP, foram consideradas incorporações de 12% do fresado, com ajuste no teor de CAP total, a fim de compensar a quantidade já presente no material fresado. Sendo assim, houve uma redução de 0,576% de CAP para as dosagens. A Figura 11 ilustra a curva de projeto dessas misturas:

Figura 11: Dosagem concreto asfáltico – faixa C – DNIT (Mistura 2)



Fonte: Autoria própria (2025).

3.2.4 Produção das Misturas Asfálticas

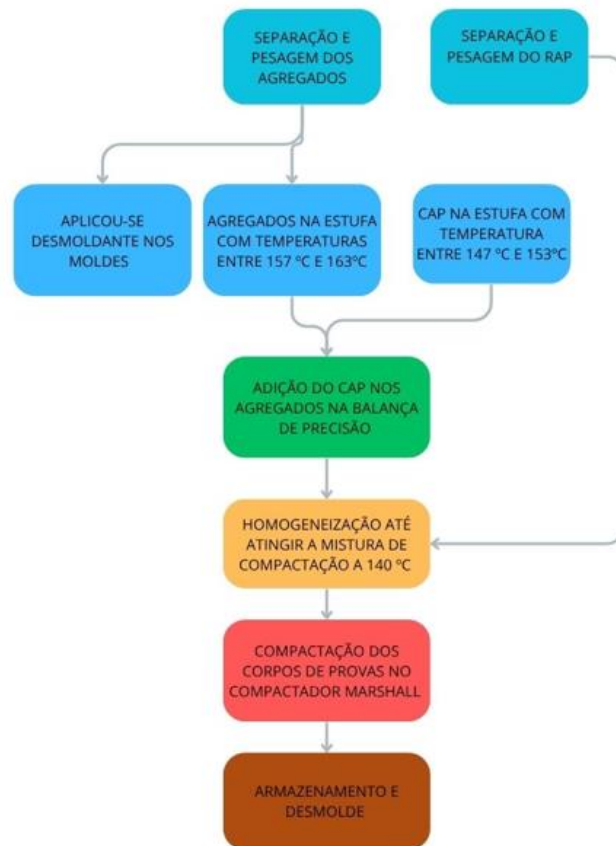
As confecções das misturas asfálticas foram realizadas no Laboratório de Materiais da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Campus Caraúbas, em etapas planejadas, seguindo um rigoroso controle de dosagem, temperatura e processo de incorporação do fresado. Antes da confecção das amostras, foram detalhadas as dosagens das misturas, especificando as proporções de cada fração de agregado e ligante na composição final, sendo considerada uma massa total de 1.200g para cada corpo de prova. A Figura 12 representa o fluxograma dos corpos de prova sem incorporação do RAP, passo a passo desse processo. Já na Figura 13, o fluxograma dos corpos de prova com introdução do RAP a frio. Na Figura 14 é demonstrado como se deu o processo de introdução do RAP a quente.

Figura 12: Fluxograma dos corpos de prova da amostra sem incorporação do RAP, elaborados em laboratório.



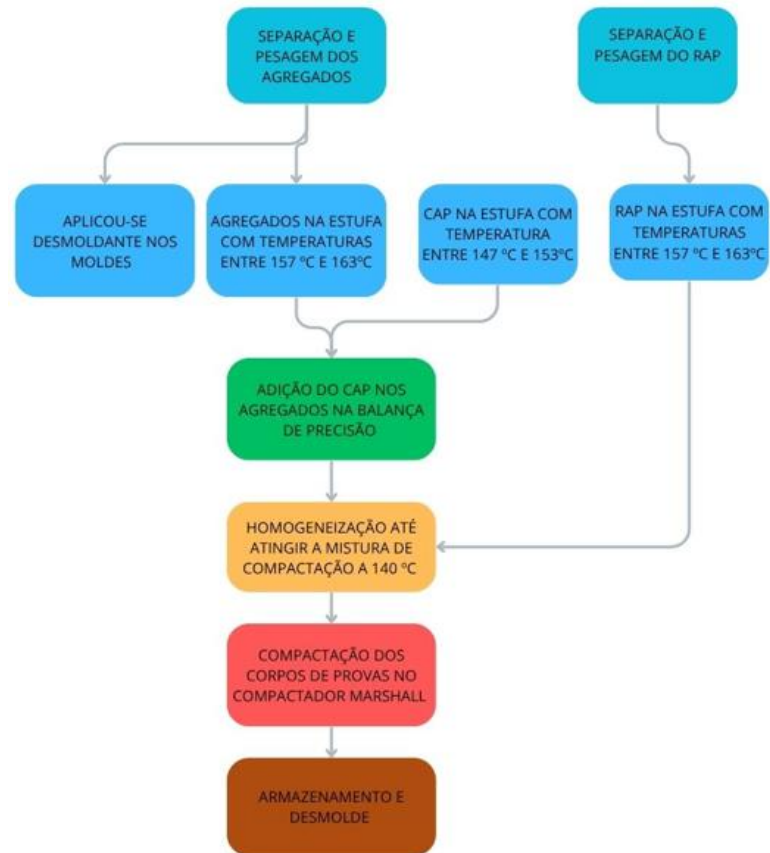
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 13: Fluxograma dos corpos de prova com introdução do RAP a frio, elaborados em laboratório.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 14: Fluxograma dos corpos de prova com introdução do RAP a quente, elaborados em laboratório.



Fonte: Autoria própria (2025).

O primeiro passo consistiu na pesagem e separação das quantidades de cada agregado, componentes das misturas em seus respectivos recipientes. Como pode-se identificar na Figura 15.

Figura 15: Pesagem e separação dos agregados das misturas asfálticas.



Fonte: Autoria própria (2025).

Em seguida, os materiais foram previamente aquecidos em estufa, por no mínimo duas horas, seguindo as temperaturas condizentes com a Curva de Viscosidade Saybolt Furol: ligante asfáltico entre 147 °C e 153°C, temperatura de compactação definida em 140°C e agregados entre 157 °C e 163°C. Estas faixas de temperaturas foram utilizadas para todas as misturas.

Nas misturas com adição de RAP, foram moldados três corpos de prova com incorporação a frio, sendo que a fração de RAP correspondente a cada amostra foi previamente separada em recipientes individuais para posterior adição à mistura. O RAP com incorporação a quente, foi previamente separado em recipientes e aquecido na mesma temperatura dos agregados, para ser incrementado com os agregados e ligante.

Após o pré-aquecimento dos componentes das misturas asfálticas, aplicou-se o de desmoldante em todos os moldes de corpos de prova. A próxima etapa foi a retirada de cada corpo de prova da estufa e o incremento da quantidade exata de CAP na mistura, com o auxílio da balança de precisão. Figura 16, mostra aplicação do desmoldante e balança utilizada para incremento do CAP.

Figura 16: Aplicação do desmoldante e balança de precisão



Fonte: Autoria própria (2025).

Logo em seguida, para as amostras sem o RAP foram feitas as homogeneizações das misturas no fogão, até atingir a temperatura de compactação de 140 C°. Na Figura 17 a mistura do corpo de prova sem incremento do RAP.

Figura 17: Mistura do corpo de prova sem adição do RAP.



Fonte: Autoria própria (2025).

Já as amostras com incremento do RAP, o material fresado tanto a frio como a quente foi adicionado somente na mistura no fogão até atingir a temperatura de compactação de 140 C°. Na Figura 18 a mistura do corpo de prova com incremento do RAP, tanto a frio como a quente respectivamente.

Figura 18: Mistura do corpo de prova com adição do RAP a frio e quente.



Fonte: Autoria própria (2025).

Por fim, o corpo de prova pôde ser compactado seguindo as especificações da norma DNIT 178/2018 – PRO, utilizando um compactador Marshall, sendo administrados 50 golpes em cada face. O corpo de prova, juntamente com o molde, foi então armazenado em local apropriado, devidamente identificado, garantindo as condições necessárias para o seu resfriamento contínuo. Na Figura 19 apresenta o corpo de prova sendo compactado no compactador Marshall.

Figura 19: Compactação do corpo de prova no Compactador Marshall.



Fonte: Autoria própria (2025).

Por fim, os corpos de prova foram submetidos a ensaios laboratoriais de caracterização para determinação do volume de vazios (V_V), densidade aparente do CP (G_{mb}), vazios com betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM), relação betume / vazios (RBV), além do ensaio mecânico de resistência à tração por compressão diametral. Na Figura 20 ilustra os corpos de provas e o ensaio de resistência a tração por compressão diametral.

Figura 20: Corpos de provas e ensaio de resistência a tração por compressão diametral.



Fonte: Autoria própria (2025).

Para cálculos foram usadas as seguintes equações:

O volume de vazios (V_V) foi calculado pela seguinte equação 1:

$$V_V = \left(\frac{1 - G_{mb}}{DMT} \right) \times 100 \quad (1)$$

Em que:

G_{mb} – densidade aparente;

DMT – densidade máxima teórica;

A densidade aparente (G_{mb}) foi determinada pela equação 2:

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_s - M_{SUB}} \quad (2)$$

Em que:

M_s – massa seca;

M_{SUB} – massa submersa;

Os vazios com betume (VCB) foram obtidos conforme a equação 3:

$$VCB = \frac{(G_{mb} \times \%CAP)}{G_a} \quad (3)$$

Em que:

$\%CAP$ – teor de ligante;
 G_a – densidade do CAP;

O volume de vazios do agregado mineral (VAM) foi calculado pela equação 4:

$$VAM = V_v + VCB \quad (4)$$

A relação betume/vazios (RBV) foi determinada pela equação 5:

$$RBV = \left(\frac{VCB}{VAM} \right) \times 100 \quad (5)$$

Os ensaios laboratoriais de caracterização foram realizados conforme os procedimentos estabelecidos pela metodologia Marshall. No que se refere ao ensaio mecânico de resistência à tração por compressão diametral, este foi conduzido com base na norma DNIT 136/2018 – ME, que dispõe sobre a determinação da resistência à tração por compressão diametral. Essa norma estabelece a equação 6 como referência para o cálculo da tensão de tração resistida pelo corpo de prova.

$$\sigma_R = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H} \quad (6)$$

Em que:

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

F – carga de ruptura, em N;

D – diâmetro de corpo de prova, em mm;

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

Para o cálculo da densidade máxima teórica (DMT) da mistura 1 foi determinado pela equação 7 e para mistura 2 a equação 8, respectivamente:

$$DMT(M1) = 100 \div \left((\%CAP \div G_a) + \left(\%BRITA_{\frac{5}{8}} \div D_{B_{\frac{5}{8}}} \right) + \left((\%BRITA_{\frac{1}{2}} \div D_{B_{\frac{1}{2}}}) + (\%PÓDEPEDRA \div D_{PÓDEPEDRA}) \right) \right) \quad (7)$$

$$DMT(M2) = 100 \div ((\%CAP \div G_a) + \left(\% BRITA_{\frac{5}{8}} \div D_{B_{\frac{5}{8}}} \right) + \left(\% BRITA_{\frac{1}{2}} \div D_{B_{\frac{1}{2}}} \right) + (\%PÓDEPEDRA \div D_{PÓDEPEDRA}) + (\%RAP \div D_{RAP})) \quad (8)$$

Em que:

$\% BRITA_{\frac{5}{8}}$ – percentagem da brita 5/8;

$D_{B_{\frac{5}{8}}}$ – densidade real da brita 5/8;

$\% BRITA_{\frac{1}{2}}$ – percentagem da brita 1/2;

$D_{B_{\frac{1}{2}}}$ – densidade real da brita 1/2;

$\%PÓDEPEDRA$ – percentagem do pó de pedra;

$D_{PÓDEPEDRA}$ – densidade real do pó de pedra;

$\%RAP$ – percentagem do RAP;

D_{RAP} – densidade real do RAP.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Efeito da Temperatura de incorporação do RAP

Foram analisados e comparados os resultados dos parâmetros para as misturas asfálticas tanto sem, quanto com a incorporação do RAP, considerando o impacto das formas de incorporação adotadas: a frio e a quente. Araújo (2025), utilizou para as misturas contendo RAP, três corpos de prova produzidos com incorporação a frio. Enquanto, mais três corpos de prova contendo RAP, passaram por um processo de aquecimento junto aos demais agregados, onde se deu o processo de incorporação a quente. Observa-se que, no estudo de Araújo (2025), não foi realizado o desconto do teor de ligante (CAP) presente nas amostras de RAP.

Os valores individuais obtidos para cada corpo de prova e suas médias sem incorporação de RAP, incluindo o volume de vazios (V_v), a relação betume/vazios (RBV), os vazios do agregado mineral (VAM) e os vazios com betume (VCB), podem ser visualizados na Figura 21. Os resultados obtidos para cada corpo de prova e suas médias com incorporação de RAP a frio (com desconto na porcentagem de CAP), podem ser visualizados na Figura 22. Enquanto a Figura 23 demonstra os resultados obtidos para cada corpo de prova e suas médias com incorporação de RAP a quente (com desconto na porcentagem de CAP). Para a análise e discussão dos resultados, foi considerada a média dos valores obtidos para cada conjunto de três amostras.

Figura 21: Resultados obtidos para cada corpo de prova e suas médias sem incorporação de RAP.

Teor de Ligante	5,0			
Densidade Máxima Teórica (DMT)	2,442	Densidade do CAP (Ga)		1,030
Corpo de Prova	CP 1	CP 2	CP 3	MÉDIAS
Massa Seca - Ms (g)	1189,10	1179,70	1180,10	1182,967
Massa Submersa - Ms _{sub} (g)	686,50	667,70	669,60	674,600
Volume do CP - V	502,6	512,0	510,5	508,367
Densidade Aparente do CP - Gmb	2,37	2,30	2,31	2,3272
Volume de Vazios - Vv	3,1	5,6	5,3	4,694
Vazios com Betume - VCB	11,5	11,2	11,2	11,297
Vazios do Agregado Mineral - VAM	14,6	16,8	16,6	15,991
Relação Betume / Vazios - RBV	78,7	66,5	67,8	70,987

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 22: Resultados obtidos para cada corpo de prova e suas médias com incorporação de RAP a frio (com desconto na porcentagem de CAP).

Teor de Ligante	5,0			
Densidade Máxima Teórica (DMT)	2,419	Densidade do CAP (Ga)		1,030
Corpo de Prova	CP 4	CP 5	CP 6	MÉDIAS
Massa Seca - Ms (g)	1180,1	1168,9	1178,5	1175,833
Massa Submersa - Ms _{sub} (g)	661,6	652,7	655,9	656,733
Volume do CP - V	518,5	516,2	522,6	519,100
Densidade Aparente do CP - Gmb	2,28	2,26	2,26	2,265
Volume de Vazios - Vv	5,9	6,4	6,8	6,368
Vazios com Betume – VCB	11,0	11,0	10,9	10,996
Vazios do Agregado Mineral – VAM	17,0	17,4	17,7	17,364
Relação Betume / Vazios – RBV	65,1	63,2	61,7	63,352

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 23: Resultados obtidos para cada corpo de prova e suas médias com incorporação de RAP a quente (com desconto na porcentagem de CAP).

Teor de Ligante	5,0			
Densidade Máxima Teórica (DMT)	2,419	Densidade do CAP (Ga)		1,030
Corpo de Prova	CP 7	CP 8	CP 9	MÉDIAS
Massa Seca - Ms (g)	1172,8	1179,4	1168,5	1173,567
Massa Submersa - Ms _{sub} (g)	661,2	665,9	656,2	661,100
Volume do CP - V	511,6	513,5	512,3	512,467
Densidade Aparente do CP - Gmb	2,29	2,30	2,28	2,290
Volume de Vazios - Vv	5,2	5,1	5,7	5,340
Vazios com Betume – VCB	11,1	11,1	11,1	11,117
Vazios do Agregado Mineral – VAM	16,4	16,2	16,8	16,457
Relação Betume / Vazios – RBV	68,0	68,8	65,9	67,569

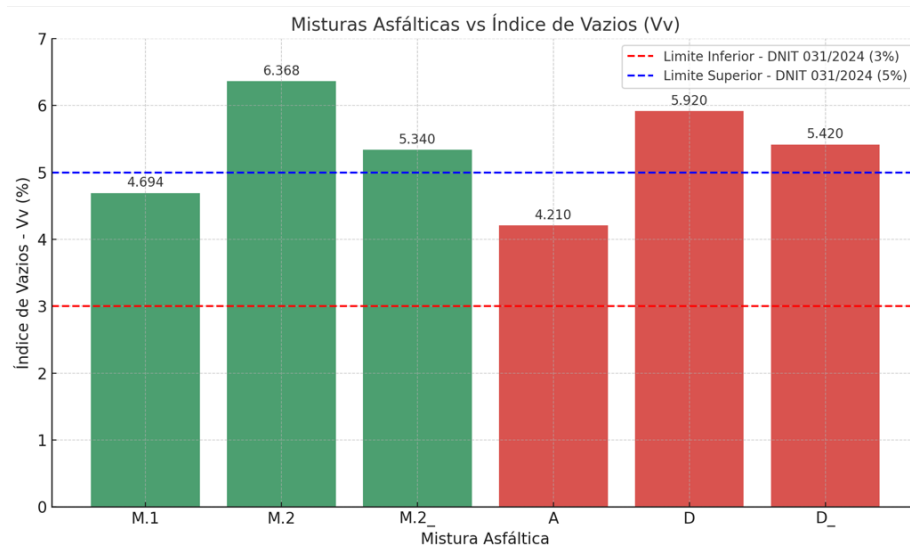
Fonte: Autoria própria (2025).

Como pode ser observado nas figuras acima, para obtenção dos resultados foi utilizada para cada mistura, uma Densidade Máxima Teórica (DMT) específica, resultando nos valores demonstrados. Se comparado aos resultados obtidos no trabalho de Araújo (2025), é possível notar uma diferença de 1,146% e 2,108% respectivamente, já que ele utilizou uma DMT única para todas as suas misturas, o qual foi fornecida pela TCPVA. Ao longo deste trabalho, as figuras dispostas nos itens a seguir, constam os resultados ilustrados em gráficos, onde as colunas em verde representam os dados obtidos no presente trabalho e as colunas em vermelho, correspondem aos valores registrados por Araújo. Com isso, é possível observar que apesar da diferença metodológica utilizada, ambos os trabalhos obtiveram resultados semelhantes.

4.1.1 Volume de Vazios (V_V)

A seguir é possível comparar os resultados obtidos nesse trabalho com os resultados de Araújo (2025), como já citado anteriormente essa diferença se dá devido a divergência da DMT, a maneira de incorporação do RAP e não remoção da porcentagem de CAP contida no RAP. A Figura 24 ilustra os resultados de V_V obtidos em ambos os trabalhos.

Figura 24: Ilustra o gráfico do comportamento das curvas dos resultados obtidos para V_V .



*As misturas asfálticas identificadas com um “_” correspondem a variação com a incorporação a quente de RAP.

Fonte: Autoria própria (2025).

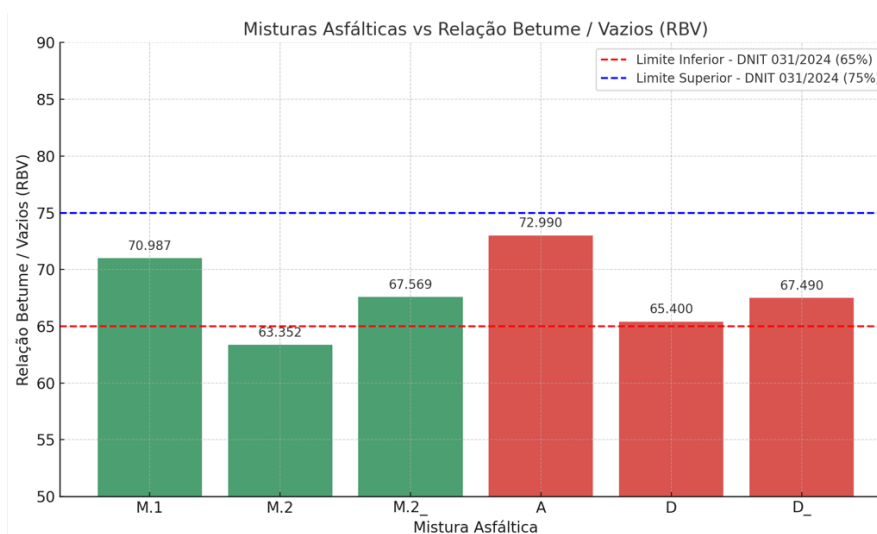
É possível observar o efeito da temperatura de incorporação do RAP no índice de vazios (V_V) das misturas asfálticas, na Figura 24, onde, fica visível que a porcentagem de vazios é maior nas misturas com incorporação a frio do RAP. Essa diferença pode ocorrer devido ao não pré-aquecimento do RAP quando este é inserido a mistura, pois o ligante residual presente nele, dificulta a mobilidade dos agregados e compromete a eficácia da compactação da mistura. Nos demais casos, onde o RAP é pré-aquecido o ligante residual passa a facilitar a mobilidade e compactação, o que ocasiona em um índice de vazios menor.

Mesmo com a ordem de incorporação do RAP para misturas a quente tenha sido diferente, os resultados seguiram a mesma tendência. Dessa forma, pode-se afirmar que a temperatura influencia no volume de vazios das misturas asfálticas, uma vez que a ativação do ligante residual é capaz de alterar a trabalhabilidade da mistura e a vida útil do pavimento.

4.1.2 Relação Betume/Vazios (RBV)

Em casos em que o RAP é adicionado a mistura asfáltica, a temperatura pode contribuir de forma bastante significativa, pois esta, influencia diretamente na ativação do betume, o que se torna essencial para o índice de vazios e para a relação Betume/Vazios (RBV). Este, é um passo fundamental para analisar a interação entre os vazios presentes na mistura e o ligante. É possível visualizar na figura 25 a Relação Betume/Vazios obtidos em ambos os trabalhos.

Figura 25: Ilustra o gráfico do comportamento das curvas dos resultados obtidos para RBV.



*As misturas asfálticas identificadas com um “_” correspondem a variação com a incorporação a quente de RAP.

Fonte: Autoria própria (2025).

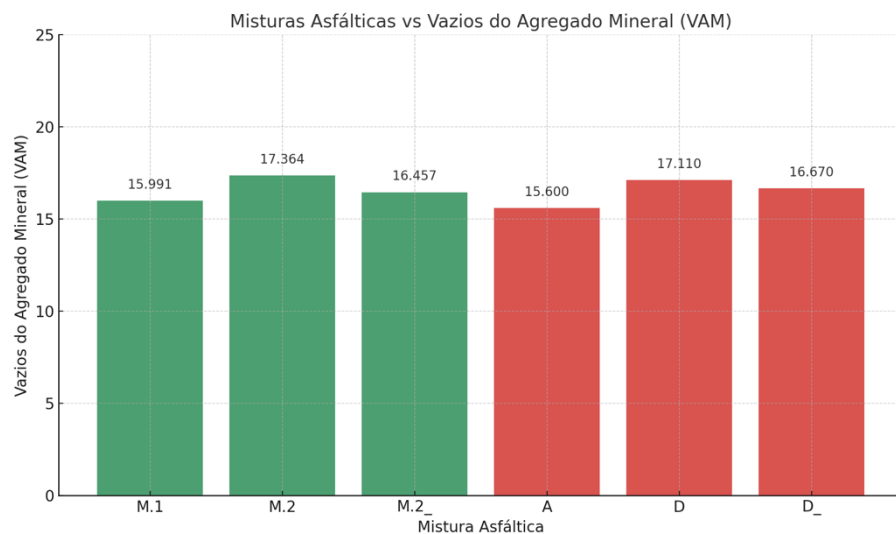
O RAP incorporado a quente resultou em valores de RBV mais elevados em relação à incorporação a frio, em razão do melhor preenchimento dos vazios pelo ligante asfáltico quando o RAP é previamente aquecido, o que favorece a coesão da mistura. Como pode ser observado na imagem acima, a mistura M2 apresentou valores abaixo do limite estabelecido pela norma, devido a diferença dos valores de DMT utilizados.

Tal diferença se dá, em decorrência da mudança de temperatura, pois quando esta sofre aumento, ela promove maior ativação do betume presente no RAP, o que favorece a aderência entre os agregados e permite que um maior número de vazios seja preenchido pelo ligante. Já quando se trata de incorporação a frio, essa ativação passa a ter limitações, dificultando a aderência e trabalhabilidade dos agregados, ocasionando em valores de RBV inferiores. Mesmo com a diferença no momento de incorporação do RAP, os resultados de ambos os trabalhos seguiram a mesma tendência.

4.1.3 Vazios do Agregado Mineral (VAM)

É possível visualizar na figura 26 os resultados de Vazios do Agregado Mineral em função da temperatura de incorporação do RAP. Onde, a cor verde representa os resultados alcançados neste trabalho e vermelho, os valores obtidos no estudo de Araújo. Com isso, é possível observar que as misturas preparadas com o RAP pré-aquecido possuem valores de VAM menores do que aquelas preparadas com a incorporação do RAP a frio.

Figura 26: resultados de Vazios do Agregado Mineral em função da temperatura de incorporação do RAP



*As misturas asfálticas identificadas com um “_” correspondem a variação com a incorporação a quente de RAP.

Fonte: Autoria própria (2025).

O comportamento apresentado na figura, indica que a temperatura de adição do RAP influencia indiretamente sobre o VAM, pois afeta a distribuição e a compactação da estrutura granular, favorecendo uma melhor acomodação dos agregados e, consequentemente, a redução dos vazios na mistura. A incorporação do RAP a frio compromete a homogeneização da mistura e dificulta a acomodação adequada dos agregados, resultando em um aumento dos VAM.

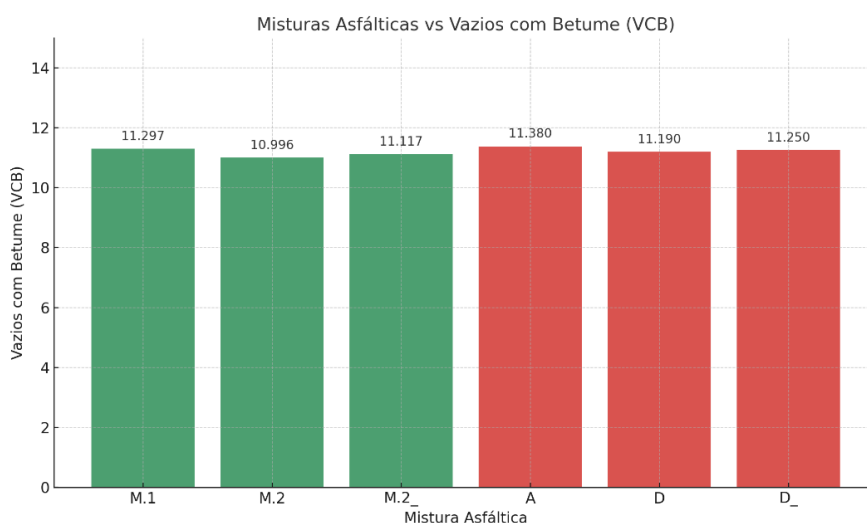
Dessa forma, o VAM é afetado no processo de incorporação do RAP, pela ação da temperatura na mistura e não pela ativação do ligante.

4.1.4 Vazios com Betume (VCB)

É possível visualizar na figura 27 os resultados de Vazios com Betume em função da temperatura de incorporação do RAP, em ambos os trabalhos. A análise dos resultados de VCB

mostra que a utilização do RAP pré-aquecido resulta em valores superiores em comparação com a incorporação a frio. Este comportamento é atribuído à reativação do ligante envelhecido presente no RAP, promovida pelo aumento da temperatura, o que otimiza a interação entre os agregados. Consequentemente, a mistura asfáltica demonstra maior homogeneidade e um preenchimento mais eficaz dos vazios pelo ligante. No entanto, é possível perceber em ambos os trabalhos, que a alteração no VCB entre a incorporação a quente e a frio, indica que a temperatura de incorporação do RAP não impacta de forma relevante nesse parâmetro, dentro das condições estudadas.

Figura 27: Ilustra o gráfico do comportamento das curvas dos resultados obtidos para VCB.



*As misturas asfálticas identificadas com um “_” correspondem a variação com a incorporação a quente de RAP.

Fonte: Autoria própria (2025).

4.1.5 Resistência à Tração (σ_R)

As figuras 28 e 29 respectivamente, apresentam os resultados obtidos para cada corpo de prova e suas médias a respeito das resistências à tração (σ_R). Os valores alcançados não atenderam os limites normativos para resistência a tração DNIT 031/2024. Tal ocorrência é atribuída ao equipamento utilizado nos ensaios, a prensa hidráulica digital para ensaio de compressão simples de concreto, de modelo Contenco TESC-2000 KN, não sendo específica

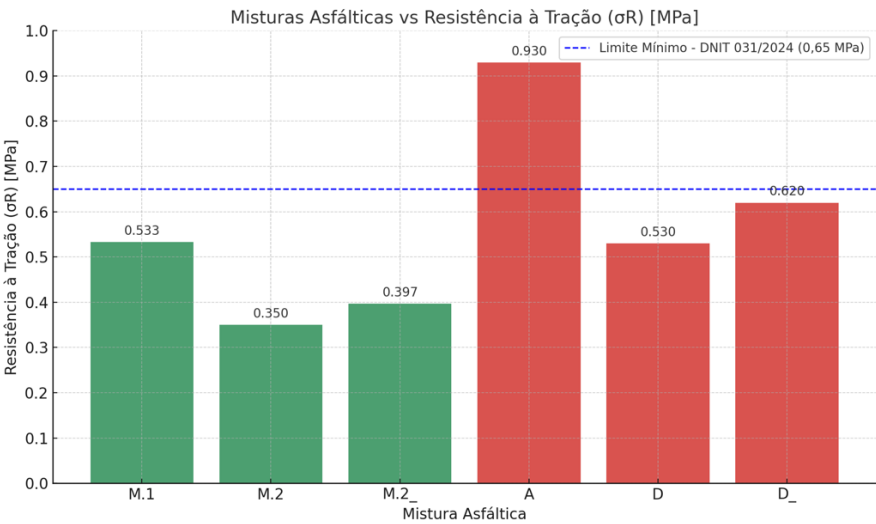
para uso de material asfáltico. No entanto, é o único equipamento disponibilizado pela universidade para esse tipo de ensaio. Durante o ensaio, não é possível ajustar a força e a velocidade, dentro dos valores exigidos pela norma, comprometendo assim a precisão dos resultados. Mas, ainda assim, se relacionados ao índice de vazios, os resultados demonstram coerência, já que a mistura com menor Vv possui uma maior (σ_R) e a mistura com maior Vv possui valor de (σ_R) menor.

Figura 28: Resultados obtidos para cada corpo de prova e suas médias a respeito das resistências à tração (σ_R).

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO		
Corpo de prova	Mpa	Média (Mpa)
CP1	0,53	0,533
CP2	0,56	
CP3	0,51	
CP4	0,35	0,350
CP5	0,37	
CP6	0,33	
CP7	0,37	0,397
CP8	0,42	
CP9	0,40	

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 29: Resistência a tração em misturas asfálticas



Fonte: Autoria própria (2025).

O ensaio realizado neste trabalho foi conduzido com 50 golpes, embora a norma recomende 75 golpes como procedimento padrão. A adoção desse valor teve como objetivo manter o comparativo com o estudo de Araújo, que utilizou a mesma quantidade de golpes.

4.2 Verificação do enquadramento normativo das Misturas Asfálticas

A Figura 30 apresenta os valores médios obtidos para o Volume de Vazios (Vv), vazios do Agregado Mineral (VAM), Relação Betume/Vazios (RBV) e Resistência à Tração (RT), para ambos os trabalhos. A Figura 31 apresenta os limites normativos correspondentes estabelecidos pela DNIT 031/2024.

Figura 30: Parâmetros volumétricos

MISTURAS	Resultados - Parâmetros volumétricos Atual				MISTURAS	Resultados - Parâmetros volumétricos Araújo (2025)			
	Vv %	RBV %	VAM %	σ_r (Mpa)		Vv %	RBV %	VAM %	σ_r (Mpa)
M1	4,694	70,987	15,991	0,533	A	4,210	72,990	15,600	0,930
M2	6,368	63,352	17,364	0,350	D	5,920	65,400	17,110	0,530
M2_	5,340	67,569	16,457	0,397	D_	5,420	67,490	16,670	0,620

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 31: Limites de acordo com a norma DNIT 031/2024

Limites normativos - DNIT 031/2024			
Vv %	RBV %	VAM %	σ_r (Mpa)
3-5	65-75	15-16	$\geq 0,65$

Fonte: Autoria própria (2025).

Com base nas figuras apresentadas acima, observa-se uma comparação entre os parâmetros volumétricos obtidos no presente estudo e os dados reportados por Araújo (2025), com os limites normativos estabelecidos pela DNIT 031/2024. Em relação ao Volume de Vazios (Vv), cujo intervalo normativo está entre 3% e 5%, apenas as misturas A e M1, atende aos requisitos, com valores de 4,210% e 4,694%. As demais misturas, tanto do estudo atual (M2 e M2_) quanto do estudo comparativo (D e D_), ultrapassam o limite superior permitido, evidenciando excesso de vazios na estrutura.

Quanto à Relação Betume/Vazios (RBV), todos os valores obtidos situam-se dentro da faixa normativa de 65% a 75%, com destaque para a mistura A, que apresentou o maior valor (72,990%), indicando um bom preenchimento dos vazios pelo ligante asfáltico. Esse resultado sugere uma adequada interação entre o ligante e os agregados.

No que se refere ao parâmetro VAM (Vazios do Agregado Mineral), cujo intervalo aceitável está entre 15% e 16%, apenas as misturas A e M1 se encontram dentro da faixa especificada, com valor de 15,600% e 15,991%. As demais misturas, tanto do presente estudo quanto do trabalho de Araújo, apresentaram valores superiores ao limite, o que pode indicar menor eficiência no empacotamento dos agregados ou variações na granulometria.

Por fim, no parâmetro de resistência à tração (σ_R), exigido mínimo de 0,65 MPa, verifica-se que nenhuma das misturas do presente estudo atinge o valor especificado. Os resultados variam entre 0,350 MPa e 0,533 MPa, demonstrando desempenho mecânico abaixo do recomendado. Somente, a mistura A, do estudo de Araújo superaram o limite permitido pelo DNIT, que obteve o maior valor de resistência (0,930 MPa), evidenciando um excelente desempenho estrutural.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a viabilidade e o desempenho do uso de material fresado de pavimentos asfálticos (RAP) em novas misturas asfálticas, considerando a crescente demanda por soluções mais sustentáveis e eficientes na engenharia de pavimentos. A pesquisa se justificou pela necessidade de otimizar o uso de recursos, reduzir o impacto ambiental e contribuir para a melhoria da infraestrutura rodoviária brasileira, que, conforme dados recentes, ainda apresenta desafios significativos em sua conservação.

Através de uma metodologia experimental rigorosa, foram produzidos e ensaiados corpos de prova com diferentes configurações: misturas sem RAP, com RAP incorporado a frio e com RAP incorporado a quente. A caracterização dos materiais e a dosagem das misturas foram realizadas com precisão, garantindo a comparabilidade dos resultados. Os ensaios laboratoriais, baseados nas normas DNIT 136/2018 e metodologia Marshall, permitiram uma análise aprofundada de parâmetros cruciais como Volume de Vazios (V_v), Vazios do Agregado Mineral (VAM), Vazios com Betume (VCB), Relação Betume/Vazios (RBV) e Resistência à Tração (σ_R).

Os resultados obtidos demonstraram claramente a influência da forma de incorporação do RAP no desempenho das misturas. A incorporação a quente se destacou por promover uma melhor compactação, uma reativação mais eficaz do ligante envelhecido presente no RAP e a obtenção de menores índices de vazios. Isso sugere que o aquecimento do RAP favorece a interação entre o ligante residual e o ligante virgem, resultando em uma mistura mais homogênea e com melhor preenchimento dos vazios. Em contrapartida, a incorporação a frio, embora mais simples em termos de processo, resultou em maiores volumes de vazios e menor resistência, indicando uma reatividade limitada do ligante envelhecido.

Um ponto relevante observado foi que, apesar dos benefícios da incorporação a quente, os valores de Resistência à Tração das misturas com RAP não atingiram o limite mínimo de 0,65 MPa estabelecido pela DNIT 031/2024. Este achado ressalta a complexidade da utilização do RAP e a necessidade de um controle ainda mais rigoroso de variáveis como temperatura de mistura e compactação, dosagem do ligante virgem e, potencialmente, a inclusão de agentes rejuvenescedores. A pesquisa reforça que a simples adição de RAP não garante automaticamente o desempenho desejado, sendo fundamental a otimização de todo o processo de dosagem e produção.

Em comparação com a literatura existente, os resultados deste trabalho mostram coerência com estudos que apontam para a viabilidade do RAP, mas também destacam os desafios relacionados à sua heterogeneidade e à necessidade de ajustes na dosagem. A contribuição deste estudo reside em fornecer dados experimentais que reforçam a aplicabilidade do RAP como uma alternativa técnica e ambientalmente promissora, especialmente no contexto brasileiro.

Para futuras pesquisas, sugere-se investigar a otimização das temperaturas de usinagem e compactação. O objetivo é maximizar a ativação do ligante asfáltico envelhecido, o que pode levar à redução do volume de vazios (V_v) e ao aprimoramento da resistência à tração (σ_R). Além disso, é fundamental a realização de ensaios laboratoriais adicionais, como os de fadiga, módulo de resiliência e deformação permanente, para uma avaliação mais abrangente do desempenho das misturas. Por fim, aprofundar os estudos sobre o uso de aditivos rejuvenescedores e sobre as melhores estratégias para ativar o ligante residual é crucial para o avanço das técnicas de reaproveitamento do RAP em misturas asfálticas recicladas.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, João Luiz Gurgel Mota. **AVALIAÇÃO DO USO DE FRESADO EM MISTURAS ASFÁLTICAS USINADAS A QUENTE NO RIO GRANDE DO NORTE**. 2025. 62 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2025.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2007. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 25 jun. 2025.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2022. 750 p.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. . Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 3. ed. Rio de Janeiro: Petrobras, Abeda, 2010.

BORGES, Kleybson Silva. **ESTUDO DE MISTURA ASFÁLTICA RECICLADA A FRIO PARA UTILIZAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO**. 2024. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Transportes, Curso de Engenharia de Transportes, Universidade Federal de Goiás, Aparecida de Goiânia, 2024.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Norma DNIT 159/2011-ES: **Pavimentos asfálticos – Fresagem a frio – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, nov. 2011.

CANCHANYA, Job Pérez. **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E REOLÓGICO DE MISTURA ASFÁLTICA COM ADIÇÃO DE 20% DE MATERIAL FRESADO – RAP**. 2017. 132 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil Ppgec, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

CENTOFANTE, Roberta et al. Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Santa Maria, v. 23, n. 3, p. 1-19, 18 out. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0512>.

CIPRIANO, Luiz Florival *et al.* **ESTUDO COMPARATIVO DE PAVIMENTO RÍGIDO X PAVIMENTO FLEXÍVEL ATRAVÉS DA ANÁLISE DE SOLO NA PB 008**. *Revista Acta Scient Ia*, [s. l], v. 3, n. 2, p. 28-47, dez. 2021.

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

CUNHA, Célia Melo. **Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis Diferentes Tipos de Reciclagem**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2010.

LIMA, Thayse Nunes de. **REUSO DE ASFALTO NA FABRICAÇÃO DE CBUQ-REVISÃO DE LITERATURA**. 2020. 41 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, 2020.

LOPES, Ana Flavia Davanzo *et al.* **MISTURA ASFÁLTICA RECICLADA A QUENTE PRODUZIDA EM LABORATÓRIO E EM USINA – ANÁLISE DO LIGANTE E DA MISTURA**. **Anpet Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes Santos-Sp**, São Paulo, v. 2, n. , p. 1-13, dez. 2023.

LOPES, Ana Flavia Davanzo *et al.* **GERAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO RAP NO BRASIL: rap generation and usage in brazil**. **Eninfra**, Brasília, v. 3, p. 201-217, nov. 2024.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA COORDENAÇÃO-GERAL DE ESTUDOS E PESQUISA INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. **MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO PUBLICAÇÃO IPR – 719: MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**. 3 ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias R), 2006. 274 p.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 031/2024 – ES: Pavimentação – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Brasília: Instituto de Pesquisas em Transportes – Ipr, 2024. 33 p.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA COORDENAÇÃO-GERAL DE ESTUDOS E PESQUISA INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. **DNIT PUBLICAÇÃO IPR - 720: MANUAL DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**. 2 ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas em Transportes, 2006. 310 p.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA COORDENAÇÃO-GERAL DE ESTUDOS E PESQUISA INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. **NORMA DNIT 031/2006 –ES: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**. 2 ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006. 14 p.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA COORDENAÇÃO-GERAL DE ESTUDOS E PESQUISA INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. **NORMA DNIT 033/2021 – ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado em usina a quente – Especificação de serviço**. Brasília: Instituto de Pesquisas em Transportes – Ipr, 2021. 20 p.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA COORDENAÇÃO-GERAL DE ESTUDOS E PESQUISA INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. **NORMA DNIT 136/2018 - ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2018. 9 p.

OTAVIANO, Fábio César Maximiano *et al.* **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO EM MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE COM A INCORPORAÇÃO DE LIGANTES CONVENCIONAL E MODIFICADO POR POLÍMERO.** 8º Enarc, Foz do Iguaçu, v. 1, n. , p. 1-6, jan. 2023. Semestral.

ANEXOS

DOSAGENS E IDENTIFICAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS – ARAÚJO (2025)

Mistura	Dosagem				
	CAP 50/70	Brita 16mm	Brita 12mm	Pó de Pedra	RAP
A	5%	17,20%	29,45%	48,36%	-
B	5%	17,00%	22,00%	48,00%	8,00%
C	5%	16,33%	21,33%	47,33%	10,00%
D	5%	15,67%	20,67%	46,67%	12,00%
E	4,61%	17,12%	22,12%	48,12%	8,00%
F	4,52%	16,49%	21,49%	47,49%	10,00%

Mistura	Amostra	Descrição
A	C`	Dosagem Padrão com 5% de CAP (sem RAP)
	C``	Dosagem Padrão com 5% de CAP (sem RAP)
	C```	Dosagem Padrão com 5% de CAP (sem RAP)
B	CP1	Dosagem com 8% de RAP - Frio
	CP2	Dosagem com 8% de RAP - Frio
	CP3	Dosagem com 8% de RAP - Frio
	CP4	Dosagem com 8% de RAP - Quente
	CP5	Dosagem com 8% de RAP - Quente
	CP6	Dosagem com 8% de RAP - Quente
C	CP7	Dosagem com 10% de RAP - Frio
	CP8	Dosagem com 10% de RAP - Frio
	CP9	Dosagem com 10% de RAP - Frio
	CP10	Dosagem com 10% de RAP - Quente
	CP11	Dosagem com 10% de RAP - Quente
	CP12	Dosagem com 10% de RAP - Quente
D	CP13	Dosagem com 12% de RAP - Frio
	CP14	Dosagem com 12% de RAP - Frio
	CP15	Dosagem com 12% de RAP - Frio
	CP16	Dosagem com 12% de RAP - Quente
	CP17	Dosagem com 12% de RAP - Quente
	CP18	Dosagem com 12% de RAP - Quente
E	CP19	Dosagem com 8% de RAP - Frio (com desconto de %CAP)
	CP20	Dosagem com 8% de RAP - Frio (com desconto de %CAP)
	CP21	Dosagem com 8% de RAP - Frio (com desconto de %CAP)
F	CP22	Dosagem com 10% de RAP - Frio (com desconto de %CAP)
	CP23	Dosagem com 10% de RAP - Frio (com desconto de %CAP)
	CP24	Dosagem com 10% de RAP - Frio (com desconto de %CAP)