



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

JOÃO LUIZ GURGEL MOTA ARAÚJO

**AVALIAÇÃO DO USO DE FRESADO EM MISTURAS ASFÁLTICAS USINADAS A
QUENTE NO RIO GRANDE DO NORTE**

CARAÚBAS-RN

2025

JOÃO LUIZ GURGEL MOTA ARAÚJO

**AVALIAÇÃO DO USO DE FRESADO EM MISTURAS ASFÁLTICAS USINADAS A
QUENTE NO RIO GRANDE DO NORTE**

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-RN

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.

AA658 Araújo, João Luiz Gurgel Mota .
a Avaliação do uso de fresado em misturas
asfálticas usinadas a quente no Rio Grande do
Norte / João Luiz Gurgel Mota Araújo. - 2025.
62 f. : il.

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

1. CBUQ. 2. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP).
3. Mistura asfáltica. 4. Pavimentação. 5.
Sustentabilidade. 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.

JOÃO LUIZ GURGEL MOTA ARAÚJO

**AVALIAÇÃO DO USO DE FRESADO EM MISTURAS ASFÁLTICAS USINADAS A
QUENTE NO RIO GRANDE DO NORTE**

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

Defendida em: 28 / 03 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Thiago de Jesus Souza (UFERSA)
Presidente

Prof. Dr. Wendel Silva Cabral (UFERSA)
Membro Examinador

Eng. José Victor Pitter de Lima Fonseca (TCPAV)
Membro Examinador

Dedico este trabalho a minha amada vó, dona Alvandi Gurgel Mota, que embora tenha partido, sinto que está sempre presente ao meu lado como uma estrela guia, minha eterna mãe.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de expressar minha gratidão a meu grandioso Deus, que nunca me abandonou, sempre me sustentou e me deu a força necessária para conquistar meus objetivos. Diante de momentos de ansiedade sua benevolência me acalentou, permitindo a minha evolução constante. Em segunda instância, vem o meu bem mais precioso, a minha família. Eles que sempre me apoiaram, me motivaram e sempre estiveram comigo, seja na dor ou felicidade. Destes, em especial, aos meus pais Antônio Batista de Araújo e Maria Eudaria Neta, que sucintamente vos digo, são os exemplos de homem e mulher que me inspiro e dedico eternamente o meu amor. As minhas tias, primos e irmãos, vocês são a base essencial que me mantém de pé, obrigado por serem a minha maior motivação e razão para continuar seguindo em frente.

Não posso deixar de agradecer também aos meus amigos que estiveram comigo nesta jornada, em especial, ao meu grande amigo e irmão Dailton Carvalho, pela parceria durante esses anos, pelas ajudas, motivações, conselhos e por fazer nossa amizade sincera perdurar. E, aos meus colegas e amigos Arthur Ítalo, Ellen Nathielly, Maria Clara, David Edson e Carlos Ernane por compartilharem comigo, além da amizade, momentos acadêmicos que acima de tudo vieram a somar para com meus repertórios profissional e pessoal.

Agradeço de todo coração ao meu amigo e ex-professor Eng. Wellington Lorrán Gaia Ferreira pelo apoio e orientação, seu conhecimento e experiência foram essenciais para a elaboração deste trabalho. Considero-o uma inspiração como profissional, sua ética, dedicação e humildade em compartilhar o vosso conhecimento o torna um exemplo a ser seguido e com certeza levarei seus ensinamentos pelo resto da vida.

Agradeço imensamente ao meu amigo e orientador Prof. Thiago de Jesus Souza, que cuja dedicação, conhecimento e incentivo foram fundamentais para a realização deste trabalho. Sua orientação técnica, apoio acadêmico e disponibilidade contribuíram significativamente para o desenvolvimento e aprimoramento desta pesquisa.

Por fim, agradeço à banca examinadora, meu ex-professor das disciplinas de Estradas I e II, Prof. Dr. Wendel Silva Cabral, e ao Engenheiro da usina TCPAV, Eng. José Victor Pitter de Lima Fonseca, pelo tempo dedicado em contribuição para este trabalho.

Não tenhas medo, porque estou contigo; não te aflijas, porque sou o teu Deus. Eu torno-te forte, ajudo-te, protejo-te com a minha mão direita vitoriosa.

Isaías 41:10.

RESUMO

O reaproveitamento do Reclaimed asphalt pavement (RAP) em novas misturas, tem ganhado destaque devido aos benefícios ambientais e econômicos. No entanto, a sua forma de incorporação, características volumétricas e homogeneidade, podem impactar diretamente a qualidade da mistura final. Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência do uso de material de fresagem em misturas asfálticas usinadas a quente no estado do Rio Grande do Norte, com foco em dois aspectos principais: a qualidade da mistura em função da forma de incorporação do RAP (pré-aquecido ou a frio) e os benefícios técnicos e econômicos decorrentes de sua utilização. Para isso, foram obtidos materiais como a Brita 16mm, Brita 12mm, RAP e CAP 50/70 de uma usina localizada no município de Macaíba/RN, que adota usualmente duas misturas asfálticas, uma dosagem padrão com 5% de CAP (sem RAP) e outra com um teor padrão de RAP de 8% (também sendo composta com 5% de CAP e com RAP sendo incorporado a frio). A metodologia adotada envolveu a produção de misturas asfálticas com diferentes teores de RAP (8%, 10% e 12%) e uma mistura referência sem RAP (a mesma adotada pela empresa), todas contendo 5% de CAP. As amostras foram confeccionadas em laboratório, reproduzindo as mesmas condições de temperatura utilizada pela usina. Foram consideradas duas formas de incorporação do RAP: a frio, e com pré-aquecimento, permitindo a avaliação do impacto dessa variável na qualidade da mistura asfáltica final. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios laboratoriais para determinação das características volumétricas, além da análise do impacto econômico da substituição parcial de agregados e do CAP pelo fresado. Os resultados mostraram que o aumento do teor de RAP elevou o índice de vazios e reduziu a resistência à tração, efeito minimizado quando o material reciclado foi incorporado a quente. A Relação betume/vazios (RBV) apresentou tendência de redução com o acréscimo de fresado, especialmente nas misturas com incorporação a frio, enquanto o pré-aquecimento ajudou a preservar valores mais elevados desse parâmetro. A análise econômica indicou redução no custo da mistura com o uso do RAP, mas teores elevados podem comprometer a durabilidade e resistência mecânica da mistura. Concluiu-se, portanto, que a reutilização do fresado asfáltico é uma alternativa viável, desde que acompanhada de medidas compensatórias para garantir o equilíbrio entre desempenho e custo.

Palavras-chave: CBUQ. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Mistura Asfáltica. Pavimentação. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The reuse of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in new mixtures has gained prominence due to its environmental and economic benefits. However, its incorporation method, volumetric characteristics, and homogeneity can directly impact the quality of the final mixture. This study aims to evaluate the influence of milling material use in hot-mix asphalt (HMA) in the state of Rio Grande do Norte, focusing on two main aspects: the quality of the mixture depending on the RAP incorporation method (preheated or cold) and the technical and economic benefits of its use. For this purpose, materials such as 16mm aggregate, 12mm aggregate, RAP, and CAP 50/70 were obtained from a plant located in the municipality of Macaíba/RN, which typically adopts two asphalt mixtures: a standard dosage with 5% CAP (without RAP) and another with a standard RAP content of 8% (also composed of 5% CAP, with RAP incorporated cold). The adopted methodology involved producing asphalt mixtures with different RAP contents (8%, 10%, and 12%) and a reference mixture without RAP (the same adopted by the company), all containing 5% CAP. The samples were prepared in the laboratory, reproducing the same temperature conditions used by the plant. Two RAP incorporation methods were considered: cold and preheated, allowing the evaluation of the impact of this variable on the final quality of the asphalt mixture. The specimens were subjected to laboratory tests to determine volumetric characteristics, as well as an economic analysis of the partial replacement of aggregates and CAP by RAP. The results showed that increasing the RAP content raised the air voids index and reduced tensile strength, an effect minimized when the recycled material was incorporated hot. The bitumen-to-voids ratio (RBV) tended to decrease with the increase in RAP content, especially in mixtures with cold incorporation, while preheating helped maintain higher values for this parameter. The economic analysis indicated a cost reduction in the mixture with RAP use, but high RAP contents may compromise the durability and mechanical strength of the mixture. Therefore, it was concluded that RAP reuse is a viable alternative, provided that compensatory measures are adopted to ensure a balance between performance and cost.

Keywords: CBUQ. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Asphalt Mixture. Paving. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura típica de um Pavimento Flexível.....	19
Figura 2: Estrutura típica de um Pavimento Rígido.....	20
Figura 3: Estrutura típica de um Pavimento Semi-flexível.....	21
Figura 4: Estoque de RAP em Usina de CBUQ.....	23
Figura 5: Fresadora a frio em operação.....	26
Figura 6: Agregados, CAP 50/70 e RAP.	29
Figura 7: Curva de Viscosidade Saybolt Furol - CAP 50/70.	32
Figura 8: Fluxograma com as dosagens das Misturas Asfálticas que foram avaliadas.....	33
Figura 9: Dosagens das misturas asfálticas	35
Figura 10: Curva de projeto - Mistura A - Dosagem padrão com 5% de CAP.....	35
Figura 11: Curvas de projeto - Misturas B, C e D – Dosagens com 5% de CAP	36
Figura 12: Curvas de projeto - Misturas E e F – Dosagens com 5% de CAP.....	37
Figura 13: Pesagens e separação dos agregados das misturas asfálticas.....	38
Figura 14: Incremento do teor de CAP na mistura.	39
Figura 15: Compactação do corpo de prova no Compactador Marshall.....	40
Figura 16: Ensaio de Resistência a Tração por compressão diametral.	41
Figura 17: Gráfico 1 - Temperatura vs Índice de Vazios (e%)	44
Figura 18: Gráfico 2 - Temperatura vs Relação Betume/Vazios (RBV)	46
Figura 19: Gráfico 3 - Temperatura vs VCB e VAM.	47
Figura 20: Gráfico 4 - Temperatura vs Resistência a Tração (RT).....	49
Figura 21: Resultados dos parâmetros volumétricos e limites normativos.....	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Extração de betume do RAP no rotarék.....	30
Quadro 2: Granulometria e densidades reais dos agregados e do RAP.....	31
Quadro 3: Identificações das Misturas e dos Corpos de prova.....	34
Quadro 4: Preços unitários dos componentes das misturas asfálticas.	54
Quadro 5: Custo total por tonelada de cada mistura asfáltica.....	55
Quadro 6: Resultados individuais obtidos das amostras das misturas asfálticas.	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	- Norma Brasileira
CAP	- Cimento Asfáltico de Petróleo
MA's	- Misturas Asfálticas
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
e%	- Volume de Vazios
RT	- Resistência a Tração
CP	- Corpo de Prova
CNT	- Confederação Nacional do Transporte

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	18
1.1.1 Objetivo geral	18
1.1.2 Objetivos específicos.....	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Aspectos Gerais do Pavimento.....	19
2.1.1 Definição de Pavimento	19
2.1.2 Classificação e Tipos de Pavimentos	19
2.1.3 Propriedades dos Materiais Utilizados em Misturas Asfálticas	21
2.1.3.1 Agregados.....	21
2.1.3.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)	22
2.1.4 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)	23
2.1.5 Reciclagem a Quente.....	24
2.1.6 Reciclagem a Frio.....	25
2.2 Sustentabilidade na Pavimentação Asfáltica.....	25
2.2.1 Resíduos da Fresagem Asfáltica (RAP) e sua Reutilização em Misturas Asfálticas	25
2.3 Revisão Literária de Estudos Precedentes.....	27
3 Materiais e métodos.....	29
3.1 Materiais	29
3.1.1 Distribuição granulométrica e Densidades reais dos agregados e do RAP.....	30
3.1.2 Curva de Viscosidade Saybolt Furol.....	31
3.2 Metodologia	32
3.2.1 Dosagem das Misturas Asfálticas	34
3.2.1.1 Dosagem Padrão (Mistura A).....	35
3.2.1.2 Dosagens com RAP (Misturas B, C, D, E e F).....	36

3.2.1.2.1 Misturas com RAP sem desconto de CAP (Misturas B, C e D).....	36
3.2.1.2.2 Misturas com RAP com desconto de CAP presente no fresado (Misturas E e F).....	37
3.2.2 Confeção das Misturas Asfálticas	37
3.3 Avaliação Econômica.....	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1 Efeito da Temperatura de incorporação do RAP	44
4.1.1 Volume de Vazios (e%)	44
4.1.2 Relação Betume/Vazios (RBV)	46
4.1.3 Vazios do Agregado Mineral (VAM) e Vazios com Betume (VCB)	47
4.1.4 Resistência à Tração (RT).....	48
4.2 Influência do aumento da porcentagem (%) de RAP.....	50
4.2.1 Volume de Vazios (e%)	50
4.2.2 Relação Betume/Vazios (RBV)	51
4.2.3 Vazios do Agregado Mineral (VAM) e Vazios com Betume (VCB)	51
4.2.4 Resistência à Tração.....	52
4.3 Verificação do enquadramento normativo das Misturas Asfálticas	53
4.4 Avaliação Econômica.....	54
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

O aumento da procura por alternativas sustentáveis em relação à infraestrutura viária tem sido impulsionado cada vez mais pelo aproveitamento de materiais com potencial de uso na pavimentação, principalmente considerando o elevado consumo de insumos nessa indústria, tais como agregados e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Um exemplo de material que pode ser utilizado na pavimentação é o fresado, oriundo do processo de fresagem asfáltica realizado em campo em revestimentos antigos. O uso do fresado (do inglês, reclaimed asphalt pavement – RAP) em misturas asfálticas recicladas é uma alternativa técnica e economicamente viável, favorecendo a preservação dos recursos naturais e a economia com a produção de novas dosagens deste compósito (OTAVIANO; BARBOSA; NASCIMENTO, 2023; SEGUNDO et al, 2016).

O fresado asfáltico, também conhecido como RAP, é um material resultante da remoção de camadas de revestimento de pavimento asfáltico durante processos de manutenção e reabilitação de vias. Diferente de outros resíduos da construção civil, o fresado possui uma característica singular: ele contém, em um único material, tanto os agregados minerais quanto o ligante asfáltico (CAP), que são os dois principais insumos para a confecção de mistura asfálticas. Isso confere ao fresado um potencial de reaproveitamento, permitindo sua reincorporação em novas misturas asfálticas, reduzindo a necessidade de matéria-prima virgem e promovendo uma abordagem mais sustentável (NASCIMENTO, 2011).

Apesar desse alto potencial de uso, uma grande quantidade de fresado tem sido gerada e, infelizmente, pouco aproveitada. Em muitos casos, esse material acaba sendo descartado de forma inadequada, sendo despejado em lixões ou aterros sanitários sem o devido controle ambiental. Estes resíduos provenientes da fresagem de revestimentos asfálticos, costumam ser descartados de forma imprópria, em locais como margens de rodovias, de rios, e terrenos desocupados. Essa prática de descarte irregular gera impactos ambientais consideráveis, como modificações indesejáveis na aparência urbana, assoreamento de rios e inapropriação para usufruto do solo local devido a deposição dos resíduos (LIMA, 2020).

No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) possui especificações que permitem a utilização do fresado asfáltico (RAP) em determinadas condições, buscando assegurar o desempenho e a durabilidade das estruturas viárias. Além dessas especificações, algumas diretrizes técnicas e normas já orientam a incorporação do RAP em misturas asfálticas recicladas. A norma DNIT 034/2005-ES e a ABNT NBR 033/2005-ES, por exemplo, estabelecem parâmetros para sua utilização, definindo critérios que garantem a

qualidade do pavimento resultante. Essas regulamentações, ainda que não amplamente consolidadas, representam um avanço na normatização do reaproveitamento do RAP no país.

LOPES et al. (2024) explora a situação do Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) no contexto da economia circular, enfatizando a importância de uma gestão eficiente desse recurso. A pesquisa realizada indica que, entre 2019 e 2021, o Brasil gerou em média 2,1 milhões de toneladas de RAP por ano. Entretanto, a maioria desse material, cerca de 91%, foi apenas doada ou estocada, enquanto um percentual muito reduzido, aproximadamente 0,7%, foi reciclado em misturas asfálticas a quente. Além disso, o teor médio de RAP utilizado nessas misturas foi de apenas 15%, um valor que se mostra consideravelmente inferior ao que é observado em países que já dominam práticas eficientes de reciclagem.

Diante destas constatações, conclui-se que a maior parte do RAP gerado no Brasil não está sendo utilizada de forma eficaz, revelando um potencial de estudos para o reuso deste rejeito. A pesquisa também destaca a ausência de informações claras sobre o planejamento e o reaproveitamento do RAP, o que limita a reciclagem e sua aplicação em obras de pavimentação. Portanto, uma gestão mais eficiente e a promoção de técnicas de reciclagem podem trazer benefícios econômicos e ambientais significativos para a pavimentação no Brasil, alinhando o país com práticas mais sustentáveis observadas em outras nações (LOPES; SAVASINI; ALMEIDA, 2024).

Diante desta problemática, surge na infraestrutura viária a ideia de utilizar o material fresado na implementação de novos pavimentos flexíveis. No entanto, no contexto do Rio Grande do Norte (RN), essa solução enfrenta desafios específicos, como a falta de experiência técnica na aplicação do RAP em misturas asfálticas usinadas, o que compromete a eficiência e sustentabilidade da tecnologia. Além disso, a infraestrutura das usinas de asfalto locais não está totalmente adaptada para integrar o RAP de forma adequada, seja pela ausência de equipamentos apropriados ou pelo desconhecimento dos ajustes necessários no processo produtivo. Outro fator crítico é a definição do teor ótimo de RAP e da temperatura ideal de inserção, uma vez que não há uma padronização técnica ou normativa consolidada para esses parâmetros, o que dificulta a obtenção de um desempenho satisfatório da mistura, especialmente quando consideradas as condições climáticas, estruturais e logísticas da região.

Em face das condições peculiares, quanto as condições das vias do estado do Rio Grande do Norte (RN), onde as condições climáticas e o tráfego impactam diretamente no comportamento e durabilidade do pavimento, bem como a deficiência de emprego desta técnica de usinagem no mercado local, se comparado a outros estados, é necessário investigar os potenciais da utilização do fresado. Visando assim, a imposição dos preceitos de

sustentabilidade nesta área que tende a se expandir cada vez mais, não só pelo estado, como também por toda a federação.

Portanto, o presente estudo se propõe a investigar o potencial do uso do RAP nos pavimentos locais, buscando compreender os desafios e as dificuldades encontradas em campo para a efetiva utilização desse material no estado. Questões relacionadas ao controle da temperatura no processo de usinagem do material por meio do pré-aquecimento e/ou incorporação a frio. Tais questões apresentam relevância e permitirão avaliar a viabilidade econômica, ambiental e sustentável do uso do fresado em misturas asfálticas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial de utilização do fresado asfáltico (RAP) em misturas asfálticas usinadas no estado do Rio Grande do Norte, por meio de estudos experimentais.

1.1.2 Objetivos específicos

- Investigar o impacto na mistura asfáltica a quente a depender da forma de incorporação do RAP (se pré-aquecido ou incorporado a frio).
- Avaliar o desempenho técnico do emprego do RAP nas misturas asfálticas.
- Avaliar o impacto econômico do uso do RAP em obras de pavimentação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aspectos Gerais do Pavimento

2.1.1 Definição de Pavimento

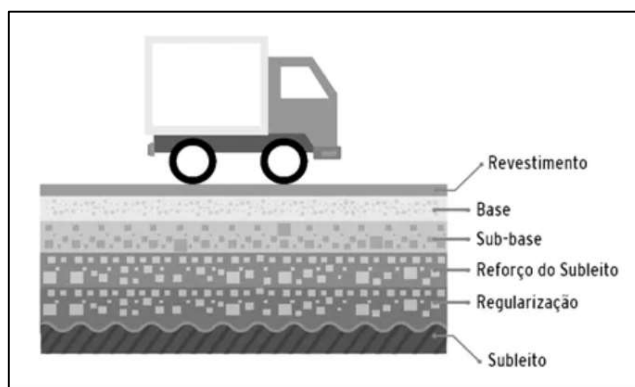
Segundo Bernucci et al., (2010), o pavimento é uma estrutura composta por várias camadas de espessuras definidas, sobrepostas a um solo preparado com terraplenagem, denominado subleito. Uma estrutura é então definida para distribuir e dissipar cargas provenientes de ações provenientes do tráfego de veículos, dissipar esforços horizontais, tais como desgaste, e proporcionar melhores condições de rolamento aos usuários, proporcionando conforto, segurança e economia.

2.1.2 Classificação e Tipos de Pavimentos

Os pavimentos podem ser classificados em três tipos principais: flexíveis, rígidos e semi-rígidos, cada um com características distintas quanto ao comportamento estrutural (BRASIL, 2006). Os pavimentos flexíveis, por exemplo, são compostos por múltiplas camadas que apresentam deformações elásticas significativas sob a ação das cargas, distribuindo os esforços de maneira proporcional entre elas. São formados por um revestimento asfáltico sobre camadas de base, sub-base e reforço do subleito.

O revestimento asfáltico, localizado na superfície, é a camada em contato direto com o tráfego e desempenha funções essenciais, como a absorção e dissipação das cargas aplicadas, impermeabilização da estrutura e melhoria das condições de rolamento, garantindo conforto e segurança para os usuários (BERNUCCI, 2010). A Figura 1 ilustra a estruturação de um pavimento flexível.

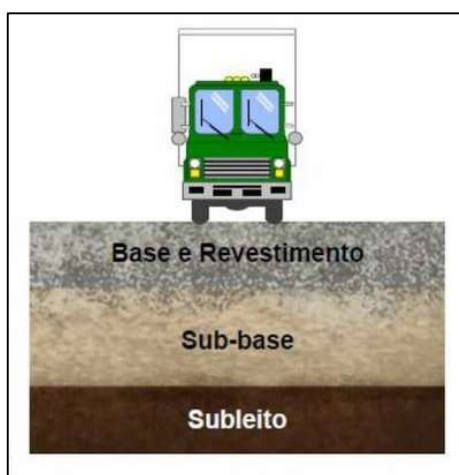
Figura 1: Estrutura típica de um Pavimento Flexível



Fonte: CNT (2017)

Os pavimentos rígidos (Figura 2), por outro lado, apresentam um revestimento de alta rigidez em comparação às camadas inferiores, o que lhes permite absorver quase todas as tensões do carregamento. Seu revestimento é constituído por placas de concreto de cimento Portland, cuja espessura é dimensionada conforme a resistência à flexão do concreto e as propriedades das camadas subjacentes. Essas placas podem ser armadas ou não, e a camada de apoio, geralmente chamada de sub-base, confere suporte estrutural ao sistema (BERNUCCI, 2010). Esse tipo de pavimento é comumente utilizado em rodovias de alto tráfego, pátios de aeroportos e terminais de carga devido à sua elevada durabilidade.

Figura 2: Estrutura típica de um Pavimento Rígido



Fonte: Master Plate (2021)

Por fim, os pavimentos semirrígidos ou semiflexíveis combinam características dos pavimentos flexíveis e rígidos, possuindo uma base cimentada por materiais com propriedades ligantes, como o solo-cimento, sendo revestidos por uma camada asfáltica. Essa estrutura proporciona maior resistência em relação aos pavimentos flexíveis, ao mesmo tempo em que mantém alguma capacidade de adaptação às deformações, evitando fissurações prematuras. Essa solução é frequentemente utilizada em vias que necessitam de maior resistência estrutural sem renunciar à flexibilidade do revestimento asfáltico. A Figura 3 ilustra a estruturação de um pavimento semiflexível.

Figura 3: Estrutura típica de um Pavimento Semi-flexível



Fonte: Master Plate (2021)

2.1.3 Propriedades dos Materiais Utilizados em Misturas Asfálticas

Os materiais usados na composição de Revestimentos Asfálticas exercem papel fundamental para garantir a resistência, durabilidade e funcionalidade dessas estruturas. Embora com diferentes características, cada material promove a distribuição e dissipação das cargas superficiais provocadas pelo tráfego e fornece condições de rolamento adequadas, que ao serem combinadas, constituem um corpo estrutural sólido capaz de promover a condição de tráfego para os usuários (BERNUCCI, 2010).

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).

Recentemente, o RAP contribuiu para a sustentabilidade da indústria de construção de rodovias devido a sua utilização permitir a substituição de parte do ligante asfáltico e dos agregados virgens em pavimentos asfálticos novos, promovendo um descarte ambientalmente adequado e reduzindo os custos de produção (GUO et al., 2020; PASETTO et al., 2021).

2.1.3.1 Agregados

Os agregados, areias, rochas minerais, pedregulho ou rochas britadas, são materiais granulares que compõem as camadas do pavimento e desempenham papéis essenciais na estrutura e no desempenho funcional. Esses materiais são os principais responsáveis pela resistência mecânica, estabilidade e durabilidade do pavimento (BERNUCCI, 2010).

A resistência mecânica é uma das propriedades mais relevantes, pois é responsável por evitar a desintegração mecânica por meio de disposições de suporte de carga. A distribuição granulométrica também é essencial para garantir o empacotamento adequado das camadas e a estabilidade delas, contribuindo para uma mistura adequada. O formato e a textura da superfície influenciam diretamente a ligação da mistura com os polímeros asfálticos, melhorando a coesão da mistura (SENÇO, 2007).

Para garantir a qualidade do agregado, são realizados testes como granulometria para avaliar a distribuição do tamanho das partículas, como o de Abrasão Los Angeles, que mede a resistência à abrasão das partículas, bem como também o a Adesividade ao CAP, que verifica a aderência do ligante asfáltico ao agregado.

2.1.3.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

A norma DNIT 095/2006 – EM define o cimento asfáltico de petróleo (CAP) como sendo um ligante betuminoso derivado do petróleo, utilizado para ligar os agregados e dar liga e coesão à mistura asfáltica. Trata-se de um polímero termoplástico que possui características reológicas e tixotrópicas, sendo amplamente utilizado na construção de pavimentos. Sua função principal é garantir a adesão entre as partículas de agregados finos e grossos, formando uma estrutura mineral que facilita a transferência de cargas da superfície para as camadas inferiores do pavimento. Ademais, o CAP demonstra alta resistência a ácidos, sais e álcalis, o que favorece a flexibilidade e a durabilidade do revestimento (MEDEIROS, 2006).

Os cimentos asfálticos de petróleo, conforme sua procedência, são classificados em: CAP-30/45, CAP-50/70, CAP-85/100 e CAP-150/200. Estes, por sua vez, são compostos predominantemente por 90 a 95% de hidrocarbonetos e uma pequena porcentagem de heteroátomos, seu comportamento químico exerce forte influência no comportamento mecânico e físico do pavimento. Devido ao grande número de hidrocarbonetos que compõem o CAP, o material torna-se passível de características químicas irreversíveis causadas pela ação de intempéries, como raios solares e água, e a combinação de contaminantes, como combustíveis e lubrificantes (NASCIMENTO, 2011).

O revestimento asfáltico é o que mais sofre processos oxidativos, acelerando o nível de envelhecimento da superfície. A oxidação do CAP realizada torna o concreto asfáltico mais enrijecido no decorrer dos anos, sendo que o material passa a ser mais rígido e frágil. Com o tempo e com o aumento do tráfego, surgem fissuras e outras patologias nas demais camadas do pavimento, vistas que são reabilitadas e conservadas (CÂNDIDO E NETO, 2018).

As propriedades do CAP podem ser aferidas por meio de diversos ensaios como o teste de penetração, que mede consistência do ligante (regido pela ABNT NBR 6576/98), o ponto de amolecimento, que avalia a temperatura em que o ligante perde sua consistência e se torna fluido (regido pela ABNT NBR 6560/2000) e o teste de envelhecimento avançado, conhecido como Estufa de Filme Fino Rotativo (RTFOT), que investiga o comportamento de ligação em situações simuladas (regido pela ABNT NBR 15235/2005).

2.1.4 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

A norma DNIT 159/2011-ES define a Fresagem como um processo mecânico, no qual há o corte ou desgaste de uma ou mais camadas de um pavimento asfáltico, através do uso de movimentos rotativos contínuos para o corte, aplicados pela sua elevação e deposição na caçamba de um caminhão basculante. Dentre as especificidades de tal técnica, estão a remoção de material excedente, permitindo a adequação do nível da superfície do pavimento e posterior reaproveitamento do resíduo procedente.

Quando incorporado em misturas asfálticas, o RAP (Figura 4) reduz a necessidade de agregados virgens e ligante asfáltico novo, preservando recursos naturais e minimizando o descarte inadequado de resíduos. Além disso, o uso do RAP diminui os custos de produção e os impactos ambientais, sendo uma alternativa sustentável e economicamente vantajosa (NASCIMENTO, 2011).

Figura 4: Estoque de RAP em Usina de CBUQ.



Fonte: Autoria própria (2025)

A reciclagem de pavimentos não apenas diminui a quantidade de resíduos enviados a aterros sanitários, mas também favorece um uso mais eficiente dos recursos naturais,

possibilitando que a indústria de pavimentação opere de forma mais sustentável. Esse procedimento ajuda a reduzir a demanda por espaço nos aterros e a minimizar os custos relacionados ao transporte de materiais (FHWA, 1996).

O Instituto de Pesquisas Rodoviárias (2005) define dois principais métodos de reciclagem de pavimentos: Reciclagem a quente (Hot Recycling), que envolve a reutilização de material em instalações industriais; e Reciclagem a frio no local (Cold In-Place Recycling - CIR), que emprega equipamentos móveis para reprocessar o pavimento no local, sem a necessidade de aquecimento.

Entretanto, o RAP necessita de caracterização adequada para garantir sua qualidade para incrementação em dosagens de Misturas Asfálticas. Propriedades como granulometria e ligante residual devem ser avaliadas para adequar as proporções e garantir o desempenho da mistura produzida.

2.1.5 Reciclagem a Quente

A reciclagem a quente das camadas asfálticas de pavimentos é regulamentada pelas seguintes normas do DNIT:

- DNIT 033/2005-ES: Especificação de Serviço para concreto asfáltico reciclado a quente em usina;
- DNIT 034/2005-ES: Especificação de Serviço para concreto asfáltico reciclado a quente no local.

Essas normas descrevem o processo no qual parte ou toda a camada de revestimento é removida, triturada em dimensões adequadas e misturada a quente, podendo ocorrer no próprio local (in situ) ou em uma usina estacionária. Durante o processo, é possível adicionar novos agregados, cimento asfáltico e agentes rejuvenescedores. O material resultante deve atender aos requisitos técnicos para misturas asfálticas a quente, podendo ser utilizado nas camadas de base, binder ou rolamento do pavimento (BRASIL, 2005).

O processo de reciclagem a quente de camadas asfálticas é composto por quatro fases. Inicialmente, são identificados segmentos homogêneos para a análise, com o ajuste da extensão conforme as condições do pavimento. Em seguida, são coletadas amostras para a realização de testes, incluindo a extração do ligante, análise granulométrica e caracterização do asfalto recuperado. A terceira fase consiste em identificar os materiais adicionais necessários, como agregados, CAP e agentes rejuvenescedores, a fim de corrigir a granulometria e restaurar as propriedades do ligante que foi envelhecido. Por último, aplica-se o Método Marshall para

determinar as proporções finais da mistura, assegurando que o desempenho atenda às especificações técnicas.

2.1.6 Reciclagem a Frio

A reciclagem a frio envolve a remoção total ou parcial da estrutura do pavimento, seguida da fragmentação em dimensões apropriadas e da mistura a frio, que pode ser realizada no local ou em uma usina. Durante esse processo, é possível incorporar materiais como emulsão asfáltica, agregados, agentes rejuvenescedores e estabilizantes químicos. A mistura obtida é utilizada como uma camada de base, a qual deve ser protegida com um tratamento superficial ou coberta com uma mistura asfáltica antes de ser submetida ao tráfego (BRASIL, 2005).

O processo de reciclagem do frio de pavimentos ocorre em etapas. Em primeiro lugar, a camada de revestimento é quebrada por um processo de escarificação, que é mais econômica, mas tem menos controle de profundidade, ou fresagem a frio, que garante um material com partículas de dimensões adequadas. Se a escarificação for usada, o material é limitado em dimensões por equipamentos adequados (BRASIL, 2005).

Em seguida, o material é misturado com estabilizadores ou rejuvenescedores, o que ocorre geralmente em usinas misturadoras, que dão um maior controle de qualidade, mas aumentam os custos e o prazo. Ele então é espalhado e compactado, e o tempo de cura é considerado. Por fim, uma nova camada de revestimento é aplicada e o processo é concluído (BRASIL, 2005).

2.2 Sustentabilidade na Pavimentação Asfáltica

Sabe-se que desenvolvimento socioeconômico de um país está diretamente relacionado às atividades da construção civil, especialmente as ligadas ao desenvolvimento logístico em ascensão, e ao transporte. Porém, como todo empreendimento de infraestrutura, torna-se crucial implementar estratégias para reduzir os custos operacionais, redução de demanda de insumos mais onerados e promover a eficiência sustentável (CABRAL, 2011).

2.2.1 Resíduos da Fresagem Asfáltica (RAP) e sua Reutilização em Misturas Asfálticas

O revestimento asfáltico, que é de vital importância nos pavimentos flexíveis, consiste em um tipo de revestimento composto pela mistura de agregados minerais e ligante betuminoso, projetada para resistir ao tráfego e apresentar durabilidade perante o desempenho de suas propriedades mecânicas.

A fresagem asfáltica, uma técnica de restauração de rodovias, é aplicada quando esse revestimento é ultrapassado em sua vida útil ou quando apresenta patologia. Trata-se é um procedimento de corte ou remoção de uma ou mais camadas do pavimento asfáltico, feito com máquinas mecanizadas, e é utilizado para retirar uma ou mais camadas danificadas, para a preparação da estrutura do pavimento que por conseguinte será restaurado (DNIT 159/2011-ES). A Figura 5 ilustra uma fresadora a frio em operação, destacando as lâminas de corte em contato com a superfície asfáltica.

Figura 5: Fresadora a frio em operação



Fonte: Wirtgen Group (2025)

Este processo é capaz de remover as camadas deterioradas do pavimento, e o material resultante, o RAP pode ser reciclado através do aproveitamento do ligante residual e de parte dos agregados e originalmente necessários em novas misturas asfálticas, atuando como uma alternativa para o descarte ambientalmente adequado deste, além de contribuir para a diminuição dos custos envolvidos na produção (GUO et al., 2020). O RAP pode ser utilizado em novas misturas asfálticas a partir da sustentabilidade em reduzir o consumo de materiais virgens e o descarte inadequado, colaborando tanto economicamente ao setor, como também propiciando boa prática socioambiental. O reaproveitamento do RAP é regulamentado principalmente pela DNIT 033/2021 – ES quanto aos critérios para uso dos materiais reciclados na pavimentação, que abrange por sua vez desde os materiais e equipamentos para a execução, como também designa fatores condicionantes ambientais e estabelece requisitos de controle da qualidade.

Outras normas já vigentes também essenciais, como por exemplo a DNIT 159/2011-ES, que por sua vez define a sistemática a ser empregada na execução de fresagem a frio de pavimento asfáltico. Nela, há a designação dos tipos de fresagem (fresagem padrão, fresagem fina e microfresagem), equipamentos necessários para a execução (como fresadoras com ajustes de profundidade precisos), Especificações de espessuras e uniformidade na remoção do material, além de condicionantes ambientais.

2.3 Revisão Literária de Estudos Precedentes

Como já mencionado anteriormente, o uso do fresado reciclado permite a preservação de recursos naturais e a redução de impactos ambientais, dado que os materiais são reaproveitados ao invés de descartados. O trabalho de Segundo et al. (2016), por exemplo, destaca a viabilidade do uso de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente (MARQ) com alto percentual de fresado (RAP) em camadas de pavimentos, especialmente como suportes para rodovias que atendem a tráfego médio e alto. Os estudos realizados demonstraram que as MARQ podem alcançar propriedades mecânicas satisfatórias, com valores de módulo de resiliência (MR) superiores a 10.000 MPa, o que se mostra adequado para a aplicação em pavimentos de elevado módulo de elasticidade.

Costa et al. (2023) analisou a ativação do ligante RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) e a influência de aditivos de reciclagem em misturas asfálticas que utilizam 100% de RAP. Entre as principais conclusões, destaca-se que a temperatura de 140°C foi o ponto ideal, onde se observou uma menor quantidade de vazios e uma significativa melhoria na resistência à tração e no módulo de resiliência das amostras. Além disso, a observação de que o óleo de algodão incrementado a mistura, o óleo de algodão proporcionou uma redução no volume de vazios da amostra de RAP, sendo mais expressiva na temperatura de 140°C e 160°C, o que pode ser benéfico em determinadas condições de aplicação.

Outro estudo bastante corroborativo para o tema foi o de Lopes et al. (2023), no qual consistiu na preparação de misturas asfálticas recicladas a quente com 10% de material asfáltico fresado (RAP), realizadas em laboratório e em usina, utilizando agregados virgens de gnaiss e um ligante asfáltico borracha (mistura de CAP com borracha moída de pneus reciclados) classificado como AB8. Ensaio mecânicos e reológicos foram aplicados para comparar o desempenho das misturas. As conclusões apontaram que a mistura produzida em campo era mais suscetível à deformação na fadiga, possivelmente devido a inadequações no recobrimento dos agregados e à relação tempo-temperatura durante a usinagem. O ligante extraído do RAP mostrou maior rigidez e a presença de modificadores foi identificada. Ressaltando, por fim, a

necessidade de adequações nas usinas para otimizar a produção de misturas recicladas e a atenção ao comportamento do ligante modificado por borracha nos ensaios avaliativos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Os materiais necessários para a confecção das misturas asfálticas (agregados e ligante asfáltico) foram provenientes da empresa TCPAV, localizada em Macaíba/RN, a aproximadamente 30 km de Natal/RN. Os agregados e o ligante asfáltico utilizados no estudo foram coletados diretamente do estoque da usina que produz mistura asfáltica do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CAUQ).

Entre os agregados, foram empregados brita 5/8, com dimensão de 16 mm, brita 0, também conhecida como cascalho, com dimensão de 12 mm, além de pó de pedra e RAP, este último proveniente da fresagem de um trecho da BR-304. Como ligante asfáltico, utilizou-se o CAP 50/70, também fornecida pelo laboratório da usina. A Figura 6 ilustra os materiais utilizados.

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



Fonte: Autoria própria (2025)

Além do fornecimento dos materiais, o laboratório da empresa disponibilizou informações técnicas pertinentes de cada um deles. Foi obtido o teor de ligante asfáltico do RAP, através da extração do betume no Rotarex (Quadro 1). Para todos agregados, foram obtidas as distribuições granulométricas e as densidades reais, essenciais para a caracterização

e dosagem das misturas. Já em relação ao ligante asfáltico, foi fornecido o ensaio de Viscosidade Saybolt Furol, permitindo a análise do comportamento reológico do CAP 50/70 e definindo as temperaturas ideais para a confecção das misturas asfálticas.

Quadro 1: Extração de betume do RAP no rotarék

	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)

3.1.1 Distribuição granulométrica e Densidades reais dos agregados e do RAP

A caracterização dos agregados das misturas asfálticas inclui a distribuição granulométrica, determinada por peneiramento, e a densidade real, obtida por meio do método do picnômetro, parâmetros essenciais para a homogeneidade e dosagem dos materiais. A granulometria avalia a adequação dos agregados às normas técnicas, enquanto a densidade real é crucial para os cálculos volumétricos. O Quadro 2 apresenta os resultados de granulometria e densidade real de cada agregado, incluindo o RAP, utilizado nas misturas.

Quadro 2: Granulometria e densidades reais dos agregados e do RAP.

Peneiras		Agregados			
Pol.	mm	Brita 16mm	Brita 12mm	Pó de Pedra	RAP
		%Passante	%Passante	%Passante	%Passante
1 1/2"	19,1	100	100	100	100
1"	25,4	100	100	100	100
3/4"	19,1	100	100	100	100
5/8"	15,87	99,6	100	100	100
1/2"	12,5	95,9	96,8	100	97,81
3/8"	9,52	85,4	80,4	100	94,84
Nº 04	4,78	14,5	13,8	100	84,14
Nº 10	2,00	2,6	1,3	70,4	63,3
Nº 40	0,42	2,2	0,9	35,9	37,57
Nº 80	0,177	1,9	0,6	17,1	21,15
Nº 200	0,074	1,6	0,3	5,6	9,3
Densidade real (Média)		2,477	2,658	2,675	2,603

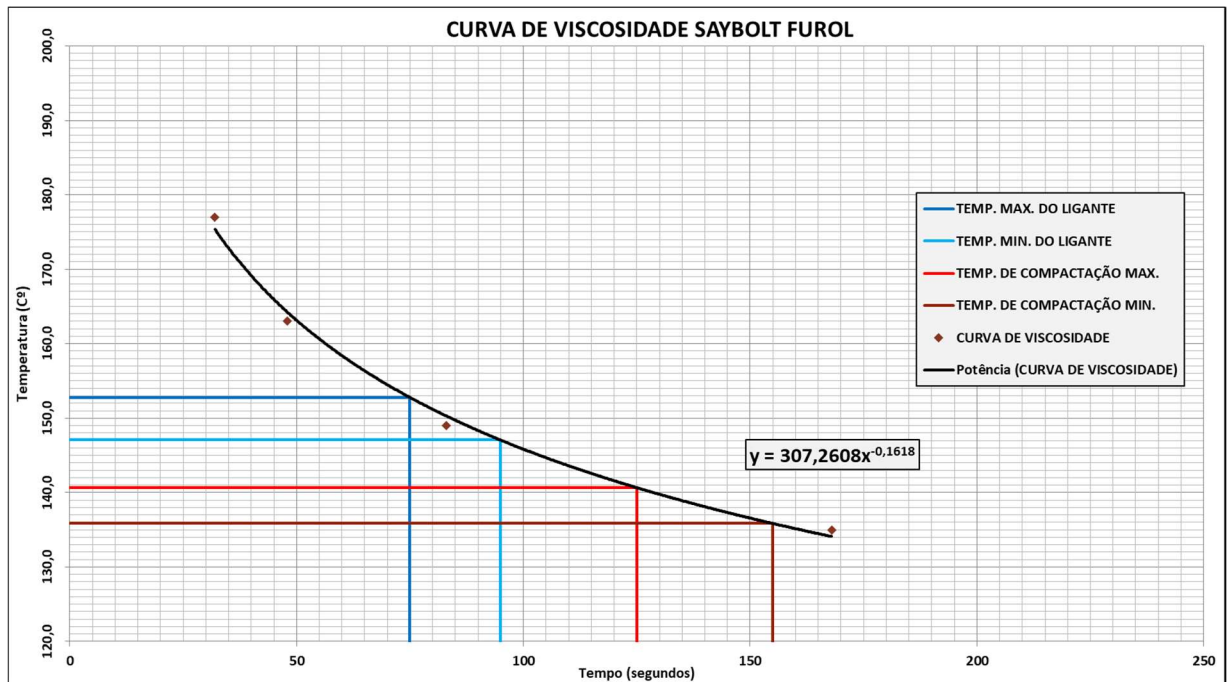
Fonte: Autoria própria (2025)

3.1.2 Curva de Viscosidade Saybolt Furol

O ligante asfáltico utilizado na dosagem padrão foi o CAP 50/70, cuja curva de viscosidade Saybolt Furol foi analisada, permitindo verificar o comportamento do ligante sob diferentes temperaturas. Esses dados auxiliam na definição da temperatura ideal de usinagem e compactação, assegurando a adequada trabalhabilidade e adesão entre os agregados. Além disso, a curva de viscosidade Saybolt Furol fornece os limites de tolerância máximos e mínimos para a temperatura do ligante na mistura, a temperatura de compactação e a temperatura dos agregados na mistura.

A Figura 7 apresenta a curva de viscosidade Saybolt Furol, ilustrando a variação da viscosidade do ligante em função da temperatura. Essa representação gráfica permite uma análise mais detalhada do comportamento reológico do CAP 50/70, sendo fundamental para a definição dos parâmetros adequados de aplicação na mistura asfáltica.

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

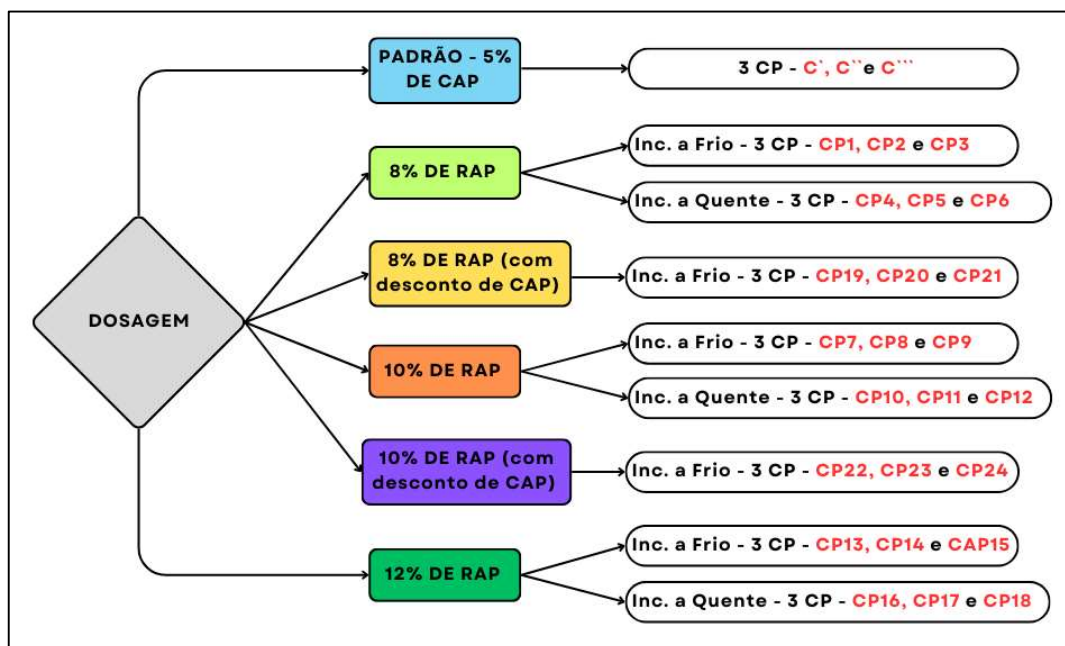


Fonte: TCPAV (2025)

3.2 Metodologia

A TCPAV opera com uma dosagem padrão de 5% de CAP, considerada a que comumente é utilizada pela empresa para revestimentos asfálticos. Usualmente, a empresa utiliza também uma dosagem com 8% de RAP (com o mesmo teor de CAP de 5%). Diante disso, a dosagem padrão de 5% de CAP (sem o incremento de RAP) foi considerada como parâmetro base do estudo, expandindo a investigação para avaliar misturas com teores de 8%, 10% e 12% de RAP (sendo o de 8% de RAP já utilizado pela empresa). Abaixo, na Figura 7, o fluxograma resume a esquematização das dosagens e combinações do estudo.

Figura 8: Fluxograma com as dosagens das Misturas Asfálticas que foram avaliadas.



Fonte: Autoria própria (2025)

Dos 27 corpos de prova confeccionados, 21 deles possuíam 5% de CAP na composição, tendo em vista que ambas as dosagens já são utilizadas pela empresa (dosagem padrão com 5% de CAP sem o RAP, e a de 5% de CAP com 8% de RAP na composição) são também com esse teor de ligante. Quanto aos demais (6 corpos de prova), correspondem as misturas de 8% de RAP e 10% de RAP, incrementado a frio, sendo feito o desconto no teor de CAP das misturas, diante do teor de CAP já presente no material fresado (4,8% de ligante no RAP).

O Quadro 3 mostra a identificação de cada corpo de prova confeccionado, com o intuito de garantir a rastreabilidade das amostras, assegurando a correta associação dos resultados dos ensaios com cada corpo de prova, considerando suas características de dosagem e método de incorporação do RA.

Quadro 3: Identificações das Misturas e dos Corpos de prova.

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)

Fonte: Autoria própria (2025)

Dessa forma, foi possível gerar um conjunto de amostras representativas para cada condição experimental, permitindo a análise comparativa entre diferentes teores de RAP e as influências do seu modo de incorporação.

Através da produção destes novos teores, foi possível a análise do desempenho de misturas asfálticas com diferentes teores de RAP, a avaliação da influência da temperatura de incorporação do fresado na mistura asfáltica, bem como os benefícios técnicos e econômicos associados ao uso deste material reciclado.

3.2.1 Dosagem das Misturas Asfálticas

Neste estudo, não foi realizada novas dosagens laboratoriais para as Misturas A e B, optando-se por replicar as dosagens adotadas pela usina. Para as demais misturas, no entanto, foi necessário adaptar as curvas de projeto, considerando o incremento de RAP e/ou modificações no teor de CAP. Nessas adaptações, buscou-se seguir os limites estabelecidos pela Faixa-C do DNIT e pela Faixa de Trabalho Interna (ajustada com base no histórico de

produção e controle tecnológico), garantindo a adequação das misturas aos padrões normativos. Bem como, buscou-se certa similaridade entre as curvas de projeto, isso porque curvas muito distintas poderiam implicar nos resultados obtidos. A Figura 9 ilustra as porcentagens dos agregados e do RAP para as diferentes misturas asfálticas desenvolvidas.

Figura 9: Dosagens das misturas asfálticas

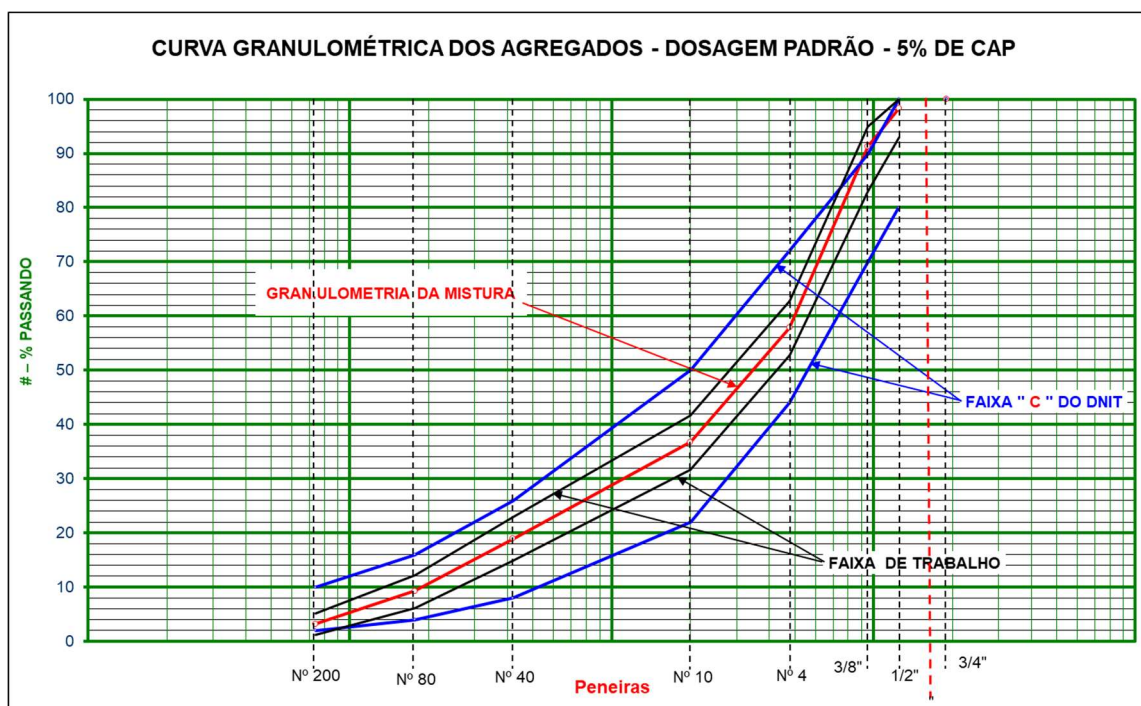
Mistura	Dosagem				
	CAP 50/70	Brita 16mm	Brita 12mm	Pó de Pedra	RAP
A	5%	17,20%	29,45%	48,36%	-
B	5%	17,00%	22,00%	48,00%	8,00%
C	5%	16,33%	21,33%	47,33%	10,00%
D	5%	15,67%	20,67%	46,67%	12,00%
E	4,61%	17,12%	22,12%	48,12%	8,00%
F	4,52%	16,49%	21,49%	47,49%	10,00%

Fonte: Autoria própria (2025)

3.2.1.1 Dosagem Padrão (Mistura A)

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 A.

Figura 10: Curva de projeto - Mistura A - Dosagem padrão com 5% de CAP.



Fonte: Autoria própria (2025)

3.2.1.2 Dosagens com RAP (Misturas B, C, D, E e F)

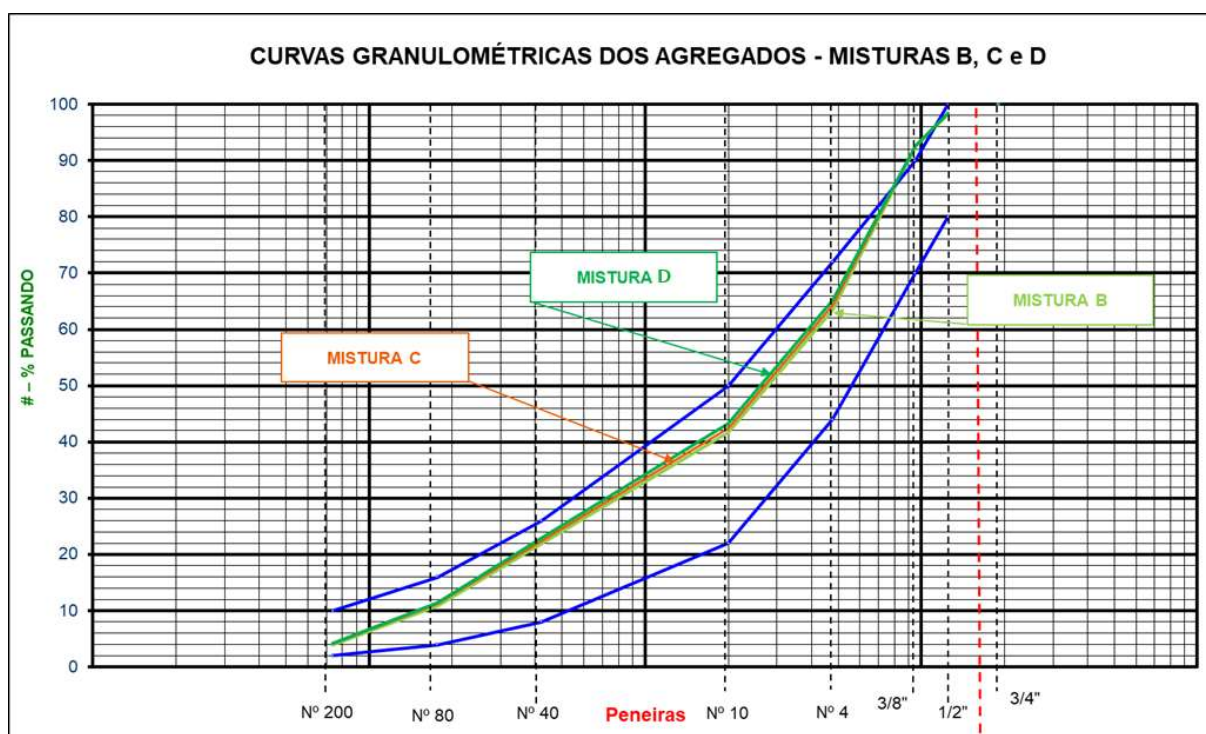
Para a avaliação do impacto da incorporação do fresado asfáltico nas misturas asfálticas, foram replicadas dosagens contendo RAP nos teores de 8%, 10% e 12%, além de misturas alternativas em que foi descontado o CAP já presente no fresado. Considerando que, na prática atual da usina, o RAP é tratado como um agregado e incorporado na proporção de 8% sem o desconto do ligante residual. Este estudo analisou diferentes cenários: um em que o RAP foi adicionado sem ajustes no teor de CAP e outro em que foi considerado o ligante já presente no fresado, realizando-se o devido desconto no CAP.

Nessas formulações, foi necessário ajustar as curvas de projeto, garantindo que os parâmetros granulométricos permanecessem dentro dos limites de Faixa-C do DNIT e da Faixa de Trabalho Interna, mas que ao mesmo tempo desenvolvessem curvas de projeto similares as curvas de projeto das dosagens já utilizadas pela usina de CBUQ.

3.2.1.2.1 Misturas com RAP sem desconto de CAP (Misturas B, C e D)

Para as misturas em que não houve desconto do CAP presente no fresado, foram adotados teores de RAP de 8%, 10% e 12%, mantendo-se um teor de CAP total de 5,0%. A Figura 11 ilustra a Curva de projeto dessas misturas.

Figura 11: Curvas de projeto - Misturas B, C e D – Dosagens com 5% de CAP

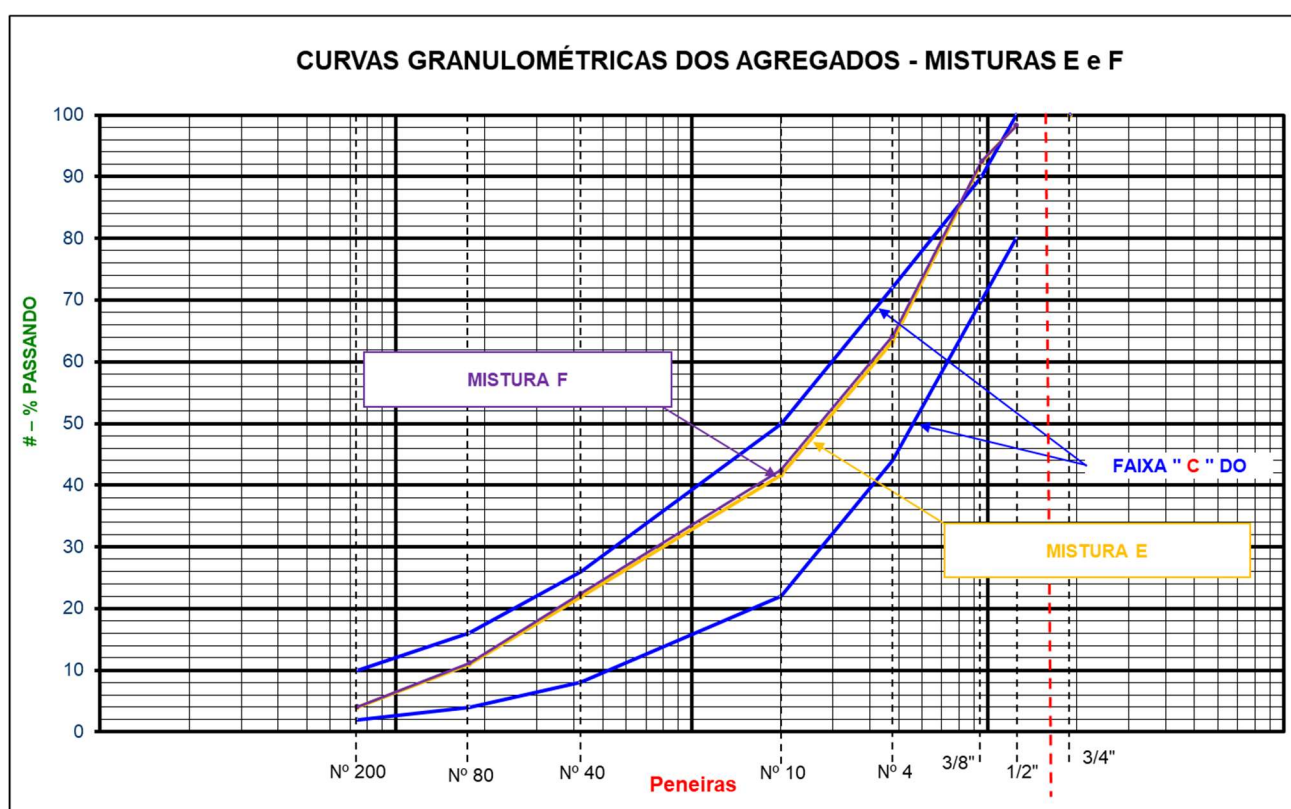


Fonte: Autoria própria (2025)

3.2.1.2.2 Misturas com RAP com desconto de CAP presente no fresado (Misturas E e F)

Para as misturas em que houve o desconto do CAP contido no RAP, foram consideradas incorporações de 8% e 10% de 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 0,39% e 0,48% de CAP para as dosagens com 8% e 10% de RAP, respectivamente. A Figura 12 ilustra a Curva de projeto dessas misturas:

Figura 12: Curvas de projeto - Misturas E e F – Dosagens com 5% de CAP.



Fonte: Autoria própria (2025)

3.2.2 Confeção das Misturas Asfálticas

A confecção das misturas asfálticas foi realizada no Laboratório de Materiais da UFERSA, 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 na composição final, sendo considerada uma massa total de 1.200g para cada corpo de prova.

O processo foi dividido em quatro dias distintos, contemplando a produção das Misturas Asfálticas e posterior realização dos ensaios. No primeiro dia, foram produzidos nove corpos de prova, incluindo amostras padrão e misturas com 8% de RAP, incorporado de duas formas distintas: a frio e a quente. O primeiro passo consistiu na pesagem e separação das quantidades de cada agregado componente das misturas em recipientes metálicos (fazendo as devidas identificações). A Figura 13, ilustra momentos desta etapa.

Figura 13: Pesagens e separação dos agregados das misturas asfálticas.



Fonte: Autoria própria (2025)

Houve também, a aplicação de desmoldante em todos os moldes de corpos de prova que posteriormente seriam utilizados. Após isso, os materiais foram previamente aquecidos em estufa, seguindo as temperaturas condizentes com a Curva de Viscosidade Saybolt Furol (Figura 7): agregados a 162,8°C, ligante asfáltico a 152,8°C e temperatura de compactação definida em 140°C. Estas faixas de temperaturas foram utilizadas para todas as combinações. Lembrando que, para as misturas contendo RAP, para a dosagem com 8% de RAP, três corpos de prova foram confeccionados com incorporação a frio (a quantidade de RAP de cada corpo de prova foi antes separada individualmente em recipientes menores, para posterior incremento a mistura), enquanto o RAP dos outros três corpos de prova passaram por um processo de aquecimento junto aos demais agregados. Esse procedimento permitiu uma avaliação comparativa entre os efeitos da forma de incorporação do RAP (a frio ou a quente) e a influência térmica na reativação do ligante residual do fresado.

Após o pré-aquecimento dos agregados, a próxima etapa foi a retirada do material da estufa e o incremento da quantidade exata de CAP na mistura, com o auxílio da balança de precisão (Figura 14).

Figura 14: Incremento do teor de CAP na mistura.



Fonte: Autoria própria (2025)

Logo em seguida, foi feita a homogeneização da mistura no fogão, até atingir a temperatura de compactação de 140 C°. Por fim, o corpo de prova pôde ser compactado seguindo as especificações da norma DNIT 178/2018 – PRO (Figura 15), 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.

Figura 15: Compactação do corpo de prova no Compactador Marshall.



Fonte: Autoria própria (2025)

No segundo dia de experimentação, foram produzidos doze novos corpos de prova, desta vez contendo teores de 10% e 12% de RAP, também avaliando os processos de incorporação a frio e a quente. A etapa inicial repetiu o procedimento de aquecimento dos materiais na estufa. As amostras foram confeccionadas conforme a dosagem pré-estabelecida: três corpos de prova para cada teor de RAP e para cada método de incorporação.

No terceiro dia, foram produzidos seis novos corpos de prova, novamente com teores de 8% e 10% de RAP. No entanto, diferentemente dos anteriores, que continham 5% de CAP na composição, nesses foi descontado o percentual de 4,8% de CAP já presente no RAP. Isso resultou em uma redução de 0,39% e 0,48% de CAP para as dosagens com 8% e 10% de RAP, respectivamente. Todos os corpos de prova foram confeccionados com incorporação a frio de RAP, conforme é comum no processo produtivo da maioria das usinas de CBUQ que utilizam esse material.

Por fim, os corpos de prova foram submetidos a ensaios laboratoriais de caracterização para determinação do Volume de Vazios ($e\%$), 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 (Figura 16).

Figura 16: Ensaio de Resistência a Tração por compressão diametral.



Fonte: Autoria própria (2025)

O Volume de Vazios ($e\%$) foi calculado pela seguinte Equação 1

$$e\% = \frac{DMT - Gmb}{DMT} \quad (1)$$

A Densidade Aparente (G_{mb}) foi determinada pela Equação 2

$$Gmb = \frac{M_s}{M_s - M_{sub}} * 0,9971 \quad (2)$$

Os Vazios com Betume (VCB) foram obtidos conforme a Equação 3.

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

O Volume de Vazios do Agregado Mineral (VAM) foi calculado pela Equação 4

$$VAM = e\% + VCB \quad (4)$$

Por fim, a Relação Betume/Vazios (RBV) foi determinada pela Equação 5.

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \quad (5)$$

Os ensaios laboratoriais de caracterização foram conduzidos conforme os procedimentos pertinentes da Metodologia Marshall. Quanto ao ensaio mecânico de resistência a tração por compressão diametral este, por sua vez, foi embasado pela norma DNIT 136/2018 – ME de determinação da resistência à tração por compressão diametral. Esta norma especifica a Equação 6 a ser utilizada para a determinação da tensão resistiva de tração do corpo de prova.

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

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.

3.3 Avaliação Econômica

Para a avaliação dos benefícios econômicos do uso de RAP em misturas asfálticas usinadas a quente, foi realizada uma análise comparativa dos custos de produção de 1 tonelada de mistura pronta. O objetivo foi quantificar a economia obtida pela redução do consumo de agregados virgens e ligante asfáltico (CAP), uma vez que o fresado contém uma fração desses materiais reaproveitáveis, permitindo uma diminuição na necessidade de matéria-prima nova e, consequentemente, uma possível redução dos custos globais da pavimentação. Além do impacto econômico, essa abordagem também se alinha a práticas mais sustentáveis, uma vez que reduz a extração de recursos naturais e promove a reutilização de materiais já disponíveis, diminuindo a quantidade de resíduos descartados.

A metodologia adotada, consiste no levantamento dos custos unitários dos insumos (agregados, CAP e RAP) e na aplicação desses valores às diferentes composições estudadas. Foram analisadas três categorias de misturas asfálticas: a mistura padrão, composta por 5% de CAP e sem a presença de RAP; as misturas com 8%, 10% e 12% de RAP, todas mantendo o teor de 5% de CAP; e, por fim, as misturas com 8% e 10% de RAP, nas quais foi realizado o desconto do teor de CAP já presente no fresado, estratégia adotada neste estudo para fins de análise.

A partir dessa comparação, foi possível avaliar o impacto econômico da substituição parcial de agregados e CAP pelo fresado, identificando a alternativa mais vantajosa em termos de custo. Além disso, os resultados obtidos poderão contribuir para uma melhor compreensão

da viabilidade da incorporação de RAP no contexto regional, visando o fornecimento de subsídios técnicos que auxiliem na tomada de decisões sobre o uso de materiais reciclados na pavimentação, promovendo alternativas economicamente eficientes e ambientalmente viáveis para a produção de misturas asfálticas sustentáveis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais das misturas asfálticas avaliadas. O Quadro 6 (Apêndice - A) ilustra os valores individuais obtidos para os corpos de prova das Misturas Asfálticas, incluindo o Volume de Vazios (e%), a Relação Betume/Vazios (RBV), os Vazios do Agregado Mineral (VAM), os Vazios com Betume (VCB) e a Resistência à Tração (RT). Para a análise e discussão dos resultados, foi considerada a média dos valores obtidos para cada conjunto de três amostras de uma mesma formulação.

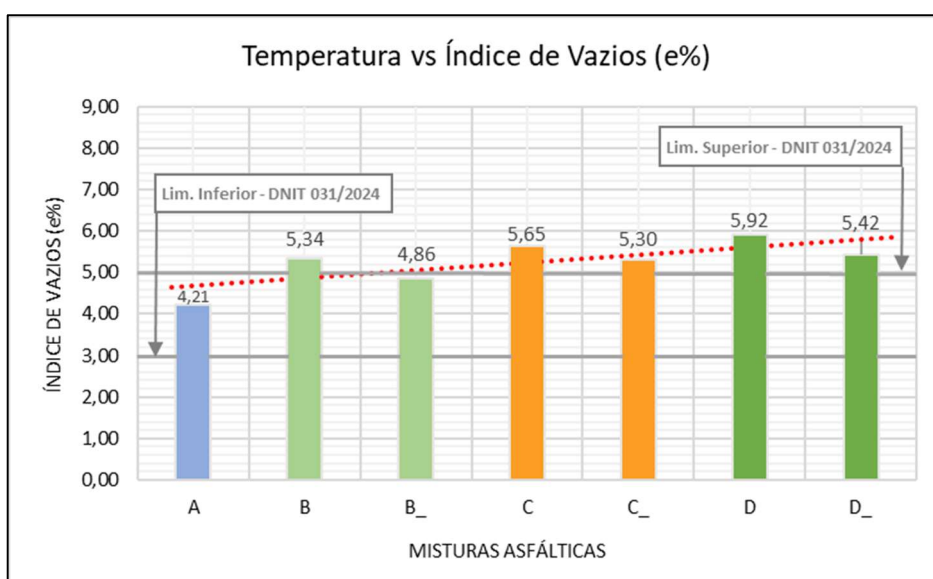
4.1 Efeito da Temperatura de incorporação do RAP

Foram analisados os resultados dos parâmetros supracitados para as Misturas Asfálticas contendo 8%, 10% e 12% de RAP, considerando o impacto das duas formas de incorporação adotadas: a frio e a quente.

4.1.1 Volume de Vazios (e%)

A Figura 17 ilustra um gráfico do comportamento das curvas dos resultados obtidos para o e%.

Figura 17: Gráfico 1 - Temperatura vs Índice de Vazios (e%)



* As MA's identificadas com um “_” correspondem a variação com a incorporação a quente de RAP.

Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 17 evidencia a influência da temperatura de incorporação do RAP no índice de vazios (*e*) das misturas asfálticas. Observa-se que, para as dosagens com RAP analisadas (8%, 10% e 12%), os índices de vazios foram entre 6,2% e 8,9% superiores nas misturas em que o RAP foi incorporado a frio, em comparação com aquelas em que foi adicionado a quente.

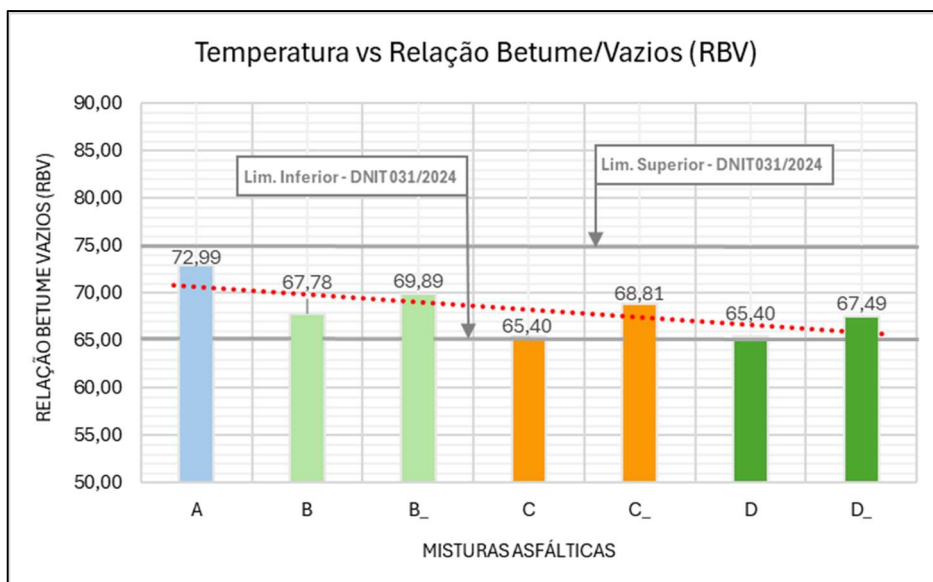
Essa diferença pode ser atribuída ao fato de que, quando o RAP é adicionado sem pré-aquecimento, o betume residual deste, tende a apresentar menor fluidez, dificultando a acomodação dos agregados e reduzindo a compactação da mistura. Já no caso do RAP pré-aquecido, ocorre uma melhor ativação do ligante residual, favorecendo assim, uma melhor trabalhabilidade e compactação, impactando na minoração do índice de vazios das misturas.

A ativação do ligante residual é um ponto bastante importante não só para este parâmetro, como também nas propriedades mecânicas e demais propriedades volumétricas. Os estudos de Costa et al. (2024) sobre a ativação relativa do ligante do RAP e avaliação da interferência de aditivos de reciclagem em misturas asfálticas com 100% de RAP, demonstrou que o ligante presente no RAP apresentou 100% de ativação na temperatura de 140°C. Além disso, observou-se que a temperatura de 160°C aparentou ser mais eficiente na redução do volume de vazios das amostras com zeólita (óleo utilizado como aditivo).

Diante disso, evidencia-se a influência da temperatura tanto na ativação do ligante residual, quanto no volume de vazios das misturas asfálticas, impactando diretamente a trabalhabilidade, a durabilidade e o desempenho mecânico do pavimento.

4.1.2 Relação Betume/Vazios (RBV)

Figura 18: Gráfico 2 - Temperatura vs Relação Betume/Vazios (RBV)



* As MA's identificadas com um "_" correspondem a variação com a incorporação a quente de RAP.

Fonte: Autoria própria (2025)

A Relação Betume/Vazios (RBV) é um parâmetro essencial para avaliar a interação entre o ligante e os vazios na mistura asfáltica. Nos casos em que há a incorporação do RAP, a temperatura influencia significativamente a relação RBV das misturas, isso porque, tão quanto no índice de vazios, a ativação do ligante residual faz-se relevante; e esta ativação, por sua vez, está diretamente relacionada ao fator de temperatura.

Os resultados apresentados na Figura 18 evidenciam a influência da temperatura de incorporação do RAP na Relação Betume/Vazios (RBV) das misturas asfálticas. Observa-se que, para todas as proporções de RAP analisadas (8%, 10% e 12%), a incorporação a quente resultou em valores de RBV entre 3% e 5% superiores em comparação à incorporação a frio. Esse aumento indica um melhor preenchimento dos vazios pelo ligante quando o RAP é pré-aquecido, favorecendo a coesão da mistura. Contudo, os valores obtidos permanecem dentro dos limites estabelecidos pela norma DNIT 031/2024-ES, que recomenda valores entre 65-75% de RBV para garantir a durabilidade e desempenho das misturas asfálticas.

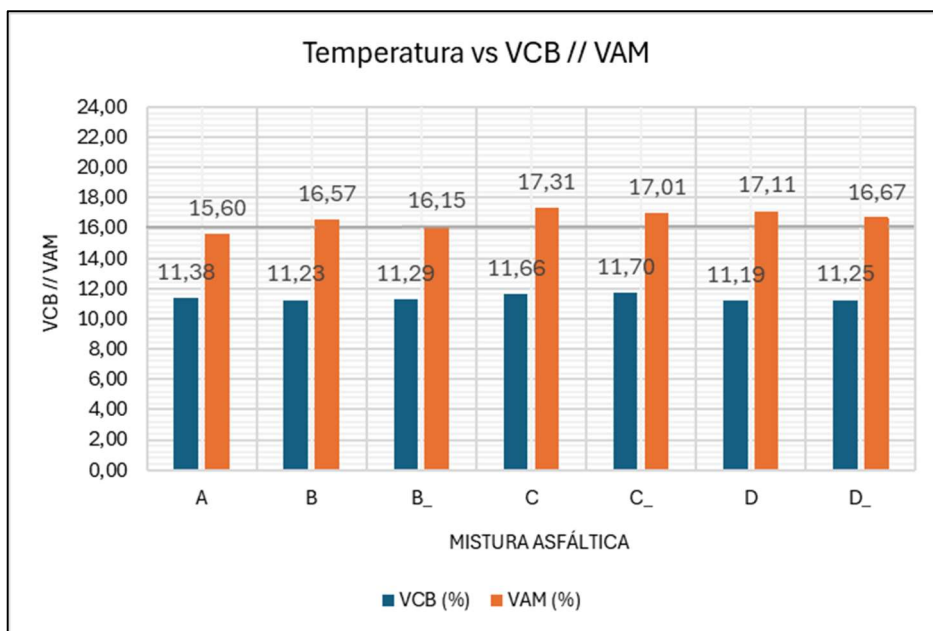
Essa diferença pode ser atribuída ao fato de que a temperatura mais elevada promove uma maior ativação do ligante residual presente no RAP, favorecendo a aderência entre os agregados e permitindo que mais vazios das misturas sejam preenchidos por ligante. No caso

da incorporação a frio, essa ativação torna-se mais limitada, o que explica os menores valores de RBV obtidos.

Contudo, vale salientar que temperaturas mais altas (acima de 140°C) apesar de promoverem a ativação do ligante do RAP, também incrementam no sucessibilidade de seu envelhecimento e queima, acarretando numa redução da coesão da mistura, que é refletida em maiores valores de Vv (%) e diminuição do RBV (COSTA et al., 2024).

4.1.3 Vazios do Agregado Mineral (VAM) e Vazios com Betume (VCB)

Figura 19: Gráfico 3 - Temperatura vs VCB e VAM.



* As MA's identificadas com um “_” correspondem a variação com a incorporação a quente de RAP.

Fonte: Autoria própria (2025)

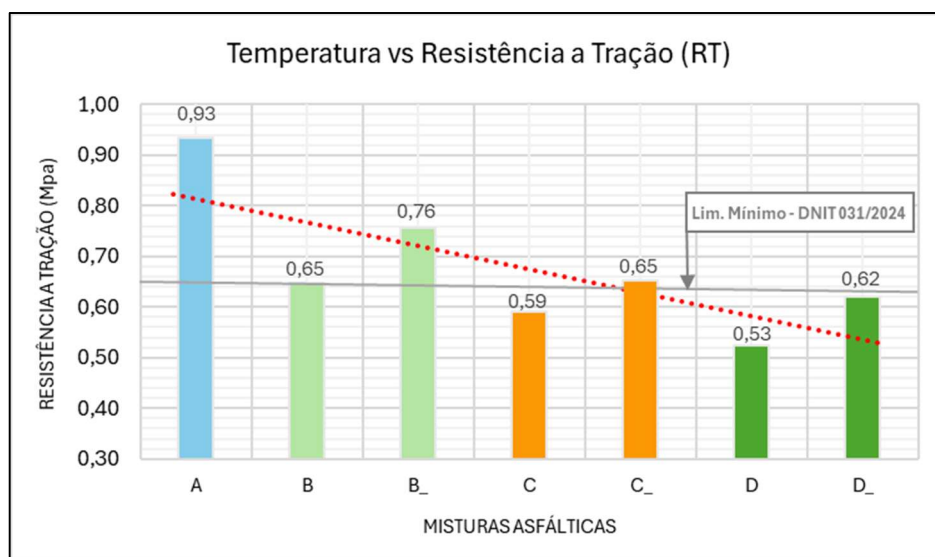
Analisando os resultados de VAM (Vazios do Agregado Mineral) e VCB (Vazios com Betume) em função da temperatura de incorporação do RAP, observa-se que as misturas produzidas com RAP pré-aquecido apresentaram valores de VAM entre 2,4% e 4,3% menores em comparação às aquelas em que o RAP foi incorporado a frio. Esse comportamento sugere que a temperatura de incorporação do RAP influencia o VAM indiretamente, afetando a distribuição e compactação da estrutura granular, possivelmente promovendo uma melhor acomodação dos agregados e uma redução dos vazios na mistura.

Quando incorporado a frio, o RAP pode dificultar a homogeneização da mistura e a acomodação dos agregados, aumentando os vazios no agregado mineral. Já o pré-aquecimento melhora a dispersão dos agregados revestidos, favorecendo um melhor empacotamento e reduzindo o VAM. Desse modo, a forma de incorporação do RAP influencia indiretamente o VAM, não diretamente pela ativação do ligante residual, mas nesse caso pelo efeito que a temperatura tem sobre a distribuição e acomodação dos agregados na mistura.

Quanto ao parâmetro de Vazios com Betume (VCB), a utilização do RAP pré-aquecido resulta em valores de VCB entre 0,3% e 0,5% superiores em comparação à incorporação a frio. Isso pode ser explicado devido ao aumento da temperatura do RAP facilitar a reativação do ligante envelhecido do material, permitindo uma melhor interação entre os agregados. Como consequência, a mistura torna-se mais homogênea e os vazios mais preenchidos por betume.

Porém, a variação no VCB é pouco significativa entre a incorporação a quente e a frio. Isso sugere que a temperatura de incorporação do RAP não impacta significativamente esse parâmetro dentro da faixa estudada.

4.1.4 Resistência à Tração (RT)

Figura 20: Gráfico 4 - Temperatura vs Resistência a Tração (RT)

* As MA's identificadas com um “_” correspondem a variação com a incorporação a quente de RAP.

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados apresentados na Figura 20 indicam que as misturas produzidas com RAP pré-aquecido apresentaram resistência à tração entre 10,2% e 17% superior em comparação com aquelas em que o RAP foi incorporado a frio. Esse comportamento revela a influência do aumento da temperatura numa possível melhora da coesão da mistura, promovendo uma melhor interação entre o ligante envelhecido do RAP, o ligante novo adicionado e os agregados da compósito.

Em suas análises, Costa et al. (2024) observaram que na temperatura de 140 °C os corpos de prova avaliados apresentaram menor volume de vazios e maior resistência à tração e módulo de resiliência, enquanto nas outras temperaturas houve um aumento do volume de vazios e redução dos valores das duas propriedades mecânicas avaliadas. Isso evidencia uma relação direta entre o índice de vazios e a resistência à tração das amostras. Misturas com menor teor de vazios geralmente apresentam maior resistência, pois há uma melhor adesão entre os agregados e o ligante betuminoso, reduzindo pontos de falha estrutural.

Lo Presti et al. (2019) destacam que, em temperaturas mais baixas, o ligante envelhecido permanece viscoso, e por conseguinte, não consegue revestir adequadamente as partículas do agregado, resultando em menores valores de resistência à tração (RT). Com o aumento da temperatura de pré-aquecimento, o ligante torna-se mais fluido, melhorando a adesão entre os materiais e elevando a RT.

No caso das misturas com RAP incorporado a quente, o menor teor de vazios favoreceu um desempenho mecânico superior, enquanto nas misturas com RAP a frio, a dispersão menos eficiente do ligante residual pode ter resultado em uma estrutura mais porosa, contribuindo para a redução da resistência à tração das amostras.

É importante destacar que as temperaturas de mistura e compactação foram mantidas dentro das faixas utilizadas para a mistura padrão sem RAP, com temperatura do ligante entre 147,1°C e 152,8°C, temperatura do agregado entre 157,1°C e 162,8°C, e temperatura de compactação entre 135,9°C e 140,7°C. No entanto, estudos normativos sobre misturas recicladas indicam que a elevação da temperatura pode ser necessária para ativar melhor o ligante residual do RAP.

Dessa forma, ajustes nas temperaturas de usinagem e compactação poderiam reduzir o índice de vazios (Vv) e melhorar os valores de resistência à tração (RT), sendo essa uma recomendação para estudos futuros.

Além disso, é imprescindível salientar a importância de uma matriz granulométrica bem formulada, aliada a um ligante betuminoso dosado corretamente e com boas características viscoelásticas, fatores essenciais para garantir a resistência mecânica adequada, e a durabilidade das misturas asfálticas ao longo de sua vida útil (BARRA, 2005).

4.2 Influência do aumento da porcentagem (%) de RAP

Foram analisados os resultados dos parâmetros supracitados para as Misturas Asfálticas contendo 8%, 10% e 12% de RAP, bem como também a dosagem padrão (sem RAP), considerando o impacto gerado pela variação da porcentagem de incorporação do fresado.

4.2.1 Volume de Vazios (e%)

O Gráfico 1 evidencia que o aumento da porcentagem de RAP nas misturas asfálticas influenciou diretamente os índices de vazios (e%) das amostras. A mistura padrão sem o incremento de RAP (A) apresentou o menor índice de vazios (4,21%), enquanto as misturas com 8% (B), 10% (C) e 12% (D) de RAP demonstraram um aumento gradual desse parâmetro. Esse comportamento pode estar associado à maior rigidez do ligante envelhecido presente no RAP, que possui maior viscosidade, reduzindo a trabalhabilidade da mistura e capacidade de acomodação coesiva entre agregados e ligante (CANESTRARI et al., 2010). Considerando que as mesmas temperaturas de usinagem foram usadas para todos.

Quanto as misturas produzidas com pré-aquecimento do RAP (B_, C_ e D_), observa-se que estas apresentaram índices de vazios ligeiramente menores em comparação com suas versões incorporadas a frio. Apesar desse efeito de redução dos vazios promovido pelo aquecimento, a tendência geral do gráfico mostra que o índice de vazios aumenta conforme cresce a porcentagem de RAP na mistura.

Logo, tem-se que este aumento progressivo de RAP sem um controle qualitativo pertinente (como ajustes nas curvas de projeto, determinação do teor ótimo de ligante e verificação de necessidade de incorporação de aditivos), assim como qualquer outro incremento a mistura asfáltica desta tipologia, pode comprometer a durabilidade e o desempenho mecânico da mistura (LI et al., 2025).

4.2.2 Relação Betume/Vazios (RBV)

No Gráfico 2, evidencia-se uma redução na Relação Betume/Vazios (RBV) com o aumento do teor de RAP nas misturas asfálticas. A mistura de referência (A), sem RAP, apresentou o maior RBV (72,99%). Com a incorporação de 8% de RAP (Mistura B), houve uma queda para 67,78, enquanto a versão com pré-aquecimento do RAP (B_) registrou um valor ligeiramente maior (69,89), indicando que o aquecimento favorece a mobilização do ligante envelhecido.

Essa tendência de redução da RBV se mantém para as misturas com 10% (C e C_) e 12% (D e D%) de RAP, ao qual constata-se menores valores na Mistura C (65,40) e na Mistura D (65,40). Entretanto, as versões com RAP pré-aquecido (C_ e D_) apresentaram valores superiores em comparação às misturas com RAP incorporado a frio, reforçando que o aquecimento melhora a redistribuição do ligante residual, favorecendo o aumento da RBV nestas variações.

Comportamento semelhante foi constatado no trabalho de Suzuki (2019), no qual foram avaliadas misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de RAP (com variações de 10, 20, 25, 35, 50 e 65% de RAP). O estudo observou que, à medida que a porcentagem de RAP aumentava, a Relação Betume/Vazios (RBV) tendia a diminuir, comportamento semelhante ao verificado no gráfico apresentado.

4.2.3 Vazios do Agregado Mineral (VAM) e Vazios com Betume (VCB)

A análise do Gráfico 3, mostra que os valores de VCB (%) e VAM (%) variações em ordem independente do aumento do teor de RAP. Observa-se que, à medida que a porcentagem

de RAP aumenta nas misturas, há uma tendência de elevação nos valores de VAM (%), enquanto os valores de VCB (%) apresentam variações menos significativas.

A estabilidade dos valores de VCB (%) sugere que a quantidade de ligante presente continua suficiente para preencher uma fração consistente dos vazios, enquanto a variação moderada do VAM (%) indica pequenas variações na porosidade da mistura a medida em que houve o acréscimo no teor de RAP. Isso implica que, apesar do aumento no volume de vazios totais, a quantidade de betume presente ainda é suficiente para garantir um percentual razoável de vazios preenchidos por ligante, especialmente nas misturas modificadas com pré-aquecimento do RAP.

Conforme explica Dave et al. (2010), o envelhecimento do CAP se manifesta principalmente pelo aumento da rigidez do material. Essa rigidez do ligante envelhecido pode reduzir sua capacidade de envolvimento dos agregados, dificultando o preenchimento dos vazios e resultando em um aumento no VAM (%). Como consequência, a distribuição do betume nos vazios pode se tornar mais limitada, o que justificar a relativa estabilidade dos valores de VCB (%).

4.2.4 Resistência à Tração

Os resultados de Resistência a tração (RT) das amostras mostram uma tendência de redução da resistência à tração (RT) à medida que a porcentagem de RAP aumenta nas misturas asfálticas. A mistura A, que não contém RAP, apresenta a maior resistência à tração (0,93 MPa), enquanto as misturas com teores progressivamente maiores de RAP (B, C e D) exibem valores inferiores.

A introdução de 8% de RAP na mistura B resultou em uma queda significativa da RT para 0,65 MPa, enquanto a variação com incorporação a quente (B₊) apresentou um leve aumento para 0,76 MPa. Nas misturas com 10% de RAP, a resistência continua a diminuir, atingindo 0,59 MPa na mistura C, com um leve ganho na variação C₊ (0,65 MPa). O comportamento se mantém na mistura D, com 12% de RAP, apresentando os menores valores de RT (0,53 MPa e 0,62 MPa na versão pré-aquecida).

Segundo Zhao (2011), a resistência à tração (RT) é um indicador da coesão entre o ligante asfáltico e os agregados. Assim, a redução da RT com o aumento do teor de RAP pode estar relacionada à menor capacidade do ligante envelhecido de proporcionar coesão eficiente entre os componentes da mistura. Esse comportamento também está associado ao índice de vazios (e%), que apresentou uma tendência a aumentar, a medida em que houve o aumento no teor de RAP, impactando diretamente a resistência mecânica.

4.3 Verificação do enquadramento normativo das Misturas Asfálticas

A Figura 21 apresenta os resultados médios obtidos para o volume de vazios (V_v), vazios do agregado mineral (VAM), vazios com betume (RBV) e resistência à tração (RT), bem como os respectivos limites normativos estabelecidos pela DNIT 031/2024.

Figura 21: Resultados dos parâmetros volumétricos e limites normativos

Mistura	Resultados - Parâmetros volumétricos				Limites normativos - DNIT 031/2024			
	Vv (e%)	VAM (%)	RBV (%)	RT (Mpa)	Vv (e%)	VAM (%)	RBV (%)	RT (Mpa)
A	4,21	15,60	72,99	0,93	3 - 5	15 - 16	65 - 75	$\geq 0,65$
B	5,34	16,57	67,78	0,65	3 - 5	15 - 16	65 - 75	$\geq 0,65$
B_	4,86	16,15	69,89	0,76	3 - 5	15 - 16	65 - 75	$\geq 0,65$
C	5,65	17,31	67,37	0,59	3 - 5	15 - 16	65 - 75	$\geq 0,65$
C_	5,30	17,01	68,81	0,65	3 - 5	15 - 16	65 - 75	$\geq 0,65$
D	5,92	17,11	65,40	0,53	3 - 5	15 - 16	65 - 75	$\geq 0,65$
D_	5,42	16,67	67,49	0,62	3 - 5	15 - 16	65 - 75	$\geq 0,65$
E	6,23	17,42	64,24	0,50	3 - 5	15 - 16	65 - 75	$\geq 0,65$
F	6,11	17,32	64,75	0,54	3 - 5	15 - 16	65 - 75	$\geq 0,65$

Fonte: Autoria própria (2025)

No que se refere ao volume de vazios (V_v), a norma estabelece um intervalo entre 3% e 5%. A mistura A (padrão) e a mistura B_ atenderam a esse critério, apresentando valores de 4,21% e 4,86%, respectivamente. No entanto, as demais misturas apresentaram valores superiores ao limite máximo, com destaque para as misturas C (5,65%), D (5,92%) e E (6,23%). Ou seja, apenas as misturas A e B_ estão dentro do intervalo recomendado pela norma, enquanto as demais misturas ultrapassam o limite máximo estabelecido.

Em relação aos vazios do agregado mineral (VAM), a norma estabelece um intervalo de 15% a 16%. A mistura A apresentou um valor de 15,60%, atendendo ao critério normativo. Por outro lado, todas as misturas que contêm RAP apresentaram valores superiores ao limite máximo, sendo a maior variação observada na mistura E (17,42%). Portanto, apenas a mistura A atende ao critério normativo para os vazios do agregado mineral (VAM), enquanto todas as misturas contendo RAP ultrapassam o limite máximo estabelecido.

Os resultados de vazios com betume (VRB) das MA's se mantiveram dentro do intervalo normativo de 65% a 75% para todas as misturas, variando entre 64% e 73%, ou seja, a relação entre a quantidade de ligante e os vazios da mistura manteve-se dentro dos limites da norma.

Quanto à resistência à tração (RT), a norma exige valores iguais ou superiores a 0,65 MPa. A mistura A apresentou o maior valor (0,93 MPa), seguida pela mistura B_ (0,76 MPa),

ambas atendendo ao critério normativo. Entretanto, algumas misturas com RAP, especialmente quando incorporado a frio, apresentaram quedas expressivas na RT. As misturas C (0,59 MPa), D (0,53 MPa), E (0,50 MPa) e F (0,54 MPa) não atenderam ao limite mínimo exigido, o que pode comprometer a resistência mecânica da pavimentação.

4.4 Avaliação Econômica

A avaliação econômica das misturas asfálticas é essencial para compreender o impacto dos custos dos materiais na formulação das composições. A Quadro 4 apresenta os preços unitários dos materiais utilizados nas misturas avaliadas, considerando seus valores por metro cúbico (m³), quilograma (kg) e tonelada (ton). Vale salientar que os valores não incluem o transporte dos materiais e foram cotados com base em pesquisa de mercado realizada no estado do Rio Grande do Norte, considerando consulta a fornecedores regionais na data-base do mês de fevereiro de 2025.

Quadro 4: Preços unitários dos componentes das misturas asfálticas.

Componente	Densidade	Preço Unitário	
Brita 16mm	2,477	p. m ³	R\$ 140,00
		p. (kg)	R\$ 0,0565
Brita 12mm	2,658	p. m ³	R\$ 150,00
		p. (kg)	R\$ 0,0564
Pó de Pedra	2,675	p. m ³	R\$ 30,00
		p. (kg)	R\$ 0,0112
RAP	2,603	p. m ³	-
		p. (kg)	-
CAP 50/70	1,027	p. ton	R\$ 5.150,00
		p. (kg)	R\$ 5,15

Fonte: Autoria própria (2025)

Diante da obtenção dos preços unitários dos materiais das MA's, a avaliação econômica delas é essencial para compreender o impacto dos custos dos materiais na formulação de suas composições. Diante disso, o Quadro 6 apresenta a análise comparativa dos custos das diferentes Misturas Asfálticas estudadas, considerando a variação na dosagem de seus componentes.

Quadro 5: Custo total por tonelada de cada mistura asfáltica.

Mistura	Dosagem		Preço p. (kg) de MA	Preço p/ 1 ton de MA
A (dosagem padrão - sem RAP)	CAP	5,00%	R\$ 0,26	R\$ 257,50
	Brita 16mm	17,20%	R\$ 0,0097	R\$ 9,72
	Brita 12mm	29,45%	R\$ 0,0166	R\$ 16,62
	RAP	-	-	-
	Pó de pedra	48,36%	R\$ 0,0054	R\$ 5,42
Custo Total p/ 1 ton da Mistura Asfáltica A				R\$ 289,26
B (8% de RAP)	CAP	5,00%	R\$ 0,26	R\$ 257,50
	Brita 16mm	17,00%	R\$ 0,0096	R\$ 9,61
	Brita 12mm	22,00%	R\$ 0,0124	R\$ 12,42
	RAP	8,00%	-	-
	Pó de pedra	48,00%	R\$ 0,0054	R\$ 5,38
Custo Total p/ 1 ton da Mistura Asfáltica B				R\$ 284,91
C (10% de RAP)	CAP	5,00%	R\$ 0,26	R\$ 257,50
	Brita 16mm	16,33%	R\$ 0,0092	R\$ 9,23
	Brita 12mm	21,34%	R\$ 0,0120	R\$ 12,04
	RAP	10,00%	-	-
	Pó de pedra	47,33%	R\$ 0,0053	R\$ 5,31
Custo Total p/ 1 ton da Mistura Asfáltica C				R\$ 284,08
D (12% de RAP)	CAP	5,00%	R\$ 0,26	R\$ 257,50
	Brita 16mm	15,67%	R\$ 0,0089	R\$ 8,85
	Brita 12mm	20,66%	R\$ 0,0117	R\$ 11,66
	RAP	12,00%	-	-
	Pó de pedra	46,66%	R\$ 0,0052	R\$ 5,23
Custo Total p/ 1 ton da Mistura Asfáltica D				R\$ 283,25
E (8% de RAP - 4,61% de CAP)	CAP	4,61%	R\$ 0,24	R\$ 237,42
	Brita 16mm	17,12%	R\$ 0,0097	R\$ 9,68
	Brita 12mm	22,12%	R\$ 0,0125	R\$ 12,48
	RAP	8,00%	-	-
	Pó de pedra	48,12%	R\$ 0,0054	R\$ 5,40
Custo Total p/ 1 ton da Mistura Asfáltica E				R\$ 264,97
F (10% de RAP - 4,52% de CAP)	CAP	4,52%	R\$ 0,23	R\$ 232,78
	Brita 16mm	16,49%	R\$ 0,0093	R\$ 9,32
	Brita 12mm	21,49%	R\$ 0,0121	R\$ 12,13
	RAP	10,00%	-	-
	Pó de pedra	47,49%	R\$ 0,0053	R\$ 5,33
Custo Total p/ 1 ton da Mistura Asfáltica F				R\$ 259,56

Fonte: Autoria própria (2025)

A análise dos custos das misturas asfálticas desenvolvidas evidencia a influência direta dos diferentes teores de RAP e do teor de CAP no preço final por tonelada de mistura. Inicialmente, observa-se que a incorporação progressiva do RAP, sem alteração no teor de CAP, contribui para a redução do custo total das misturas. Isso ocorre devido o RAP já possuir uma variedade de agregados em sua composição, reduzindo a necessidade de incremento de agregados virgens. Como consequência, as misturas que incorporam maiores teores de RAP apresentam um custo total inferior, uma vez que diminuem a demanda desses insumos.

Por outro lado, ao avaliar o impacto da variação do teor de CAP, percebe-se uma relação inversamente proporcional ao custo total da mistura. A redução do CAP, como observado nas misturas E e F, leva a uma diminuição significativa (de R\$ 29,70) no custo final da tonelada de mistura asfáltica. A mistura F, que apresenta o menor teor de CAP (4,52%), possui o menor custo por tonelada (R\$ 259,56), enquanto a mistura A, sem RAP e com 5,00% de CAP, alcança o maior valor (R\$ 289,26). Sendo assim, essa diferença de R\$ 29,70 por tonelada demonstra a expressividade econômica da redução do CAP na composição das misturas.

Fazendo uma análise comparativa com as misturas que variam o teor de RAP, mantendo o teor de CAP fixo (B, C e D), nota-se que o impacto na redução de custos é mais modesto, porém ainda sim, relevante. O incremento de 8% de RAP (Mistura B) reduz o custo de R\$ 289,26 para R\$ 284,91, enquanto, um aumento para 10% de RAP (Mistura C) reduz ainda mais o custo para R\$ 284,08. Ao atingir-se 12% de RAP (Mistura D), o custo final da mistura reduz para R\$ 283,25. A incorporação do RAP reduz o consumo de agregados virgens e, em menor grau, a demanda por CAP, mas sua influência sobre os custos é menos expressiva do que a redução direta do teor de ligante asfáltico virgem na formulação.

A economia proporcionada pela redução do teor de CAP e pela incorporação de RAP torna-se ainda mais significativa quando se considera uma produção em larga escala. No caso da TCPAV, que mantém uma produção média de 5.000 toneladas por mês, a diferença de R\$ 29,70 por tonelada entre a mistura F e a mistura A representa uma economia mensal de aproximadamente R\$ 148.500,00. Em um período de um ano, o valor global de economia pode ultrapassar R\$ 1,7 milhão, evidenciando o impacto econômico expressivo das estratégias de otimização na formulação das misturas asfálticas utilizando o RAP.

Logo, para cada incremento no teor de RAP, observa-se uma economia no custo total, mas sempre inferior à economia proporcionada por reduções no teor de CAP, tendo em vista que este, por sua vez, é o material mais onerado do compósito. Contudo, faz-se mister a realização de ajustes nas curvas de projeto e no teor do ligante (levando em consideração a ativação do ligante residual do RAP) para melhor atendimento aos critérios normativos e qualitativos, como as Faixas Granulométricas recomendadas pelo DNIT, e o Índice de vazios entre 3-5% para camadas de rolamento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo avaliar a influência da incorporação do fresado asfáltico (RAP) em misturas asfálticas usinadas a quente, considerando os impactos na qualidade volumétrica e mecânica das misturas, além dos benefícios técnicos e econômicos. Os resultados

demonstraram que a presença do RAP altera parâmetros importantes, como o índice de vazios ($e\%$), a Relação Betume/Vazios (RBV), os Vazios do Agregado Mineral (VAM), os Vazios com Betume (VCB) e a resistência à tração, evidenciando a necessidade de ajustes na dosagem e na metodologia de incorporação do material reciclado.

A análise dos índices de vazios mostrou que o aumento do teor de RAP levou a um acréscimo nos índices de vazios das misturas, efeito mais evidente nas misturas com maiores teores de material fresado. Além disso, a incorporação a quente reduziu os vazios em comparação à incorporação a frio, favorecendo a ativação do ligante residual e melhorando a compactação. Quanto aos índices de VCB e VAM, observou-se que suas variações ocorreram de forma independente do teor de RAP. O VAM (%) apresentou uma leve tendência de aumento, enquanto o VCB (%) manteve-se relativamente estável, sugerindo que o ligante disponível ainda foi suficiente para preencher os vazios. Essas variações indicam pequenas alterações na porosidade da mistura, sem comprometer significativamente sua compactação.

Quanto ao RBV, tem-se que este parâmetro apresentou uma tendência de redução com o acréscimo de RAP, o que pode estar relacionado à rigidez do ligante envelhecido, impactando a trabalhabilidade e homogeneidade da mistura. Além disso, a resistência à tração diminuiu progressivamente conforme o teor de RAP aumentou, comportamento diretamente associado ao crescimento do índice de vazios e à menor coesão da mistura. A influência da temperatura de incorporação do RAP também foi analisada, demonstrando que a incorporação a quente favorece a ativação do ligante residual, reduzindo o índice de vazios e resultando em um desempenho mecânico ligeiramente superior em comparação com a incorporação a frio.

Do ponto de vista econômico, os resultados evidenciaram que a substituição parcial de agregados e ligante virgem pelo RAP reduz os custos de produção da mistura asfáltica, tornando a utilização desse material uma alternativa viável para projetos de pavimentação, desde que sejam realizados ajustes adequados na dosagem e no processo produtivo. No entanto, a análise sugere que a incorporação de teores elevados de RAP pode comprometer a durabilidade e a resistência mecânica da mistura se não houver medidas compensatórias, como o uso de rejuvenescedores ou ajustes na curva granulométrica e teor de ligante.

Entre as limitações deste estudo, destaca-se às condições laboratoriais de execução e à variabilidade dos materiais utilizados. Apesar do controle das variáveis experimentais, pequenas oscilações na temperatura da mistura e no processo de compactação podem ter ocorrido, influenciando a reprodutibilidade dos resultados obtidos. Além disso, a pesquisa foi conduzida com um único tipo de ligante asfáltico (CAP 50/70) e variações limitadas de uma

curva granulométrica específica, o que restringe a generalização dos achados para outras condições de usinagem e diferentes composições de misturas.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a verificação da viabilidade de fazer ajustes nas temperaturas de usinagem e compactação com o intuito de melhorar a ativação desse tipo de ligante asfáltico, o que pode reduzir o índice de vazios (V_v) e melhorar os valores de resistência à tração (RT). A realização de outros tipos de ensaios laboratoriais, como fadiga, módulo de resiliência e deformação permanente. Além disso, investigações mais apuradas sobre o uso de aditivos rejuvenescedores e as formas otimização da ativação do ligante residual, com o intuito de contribuir para o aprimoramento das técnicas de reaproveitamento do RAP.

Portanto, o estudo reforça a viabilidade técnica e econômica da utilização do RAP em misturas asfálticas, desde que sejam adotadas estratégias adequadas para otimizar suas propriedades volumétricas e mecânicas. No contexto do estado do Rio Grande do Norte, onde a utilização do RAP ainda é limitada, os resultados obtidos indicam que a técnica possui grande potencial de aplicação, podendo contribuir para a otimização dos recursos disponíveis e para a melhoria da infraestrutura viária. Dessa forma, recomenda-se que estudos mais aprofundados sejam conduzidos para expandir o uso dessa tecnologia na região, permitindo sua aplicação de forma mais eficiente e normatizada.

REFERÊNCIAS

BARRA, B. S. **Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas utilizando materiais do estado do Pará com o emprego de pó calcário**. 2005. 177 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 2º ed. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2010.

BRASIL. Confederação Nacional dos Transportes - CNT. Ministério da Infraestrutura. **Transporte Rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?**. Brasília: s.n., 2017. 180 p. Disponível em: < <http://www.cnt.org.br/>>. Acesso em: 17 jan. 2019.

BRASIL. 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**. 3º ed. Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Restauração de pavimentos asfálticos** . 2. ed. - Rio de Janeiro, 2005.

CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra; MOREIRA, Kelvya Maria de Vasconcelos. **Manual sobre resíduos sólidos da Construção Civil**. Fortaleza: Sinduscon-Ce, 2011. 44 p.

CÂNDIDO, Karina Regina Silva; BARROS NETO, Manoel Gomes de. **Análise do método de fresagem como reciclagem dos pavimentos**. 2018. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário - Cesmac, Maceió, 2018.

CANESTRARI, F.; F. CARDONE; A. GRAZIANI et al. (2010) Adhesive and cohesive properties of asphalt-aggregate systems subjected to moisture damage. **Road Materials and Pavement Design**, v. 11, n. sup1, p. 11-32. DOI: 10.1080/14680629.2010.9690325.

COSTA, Laiana Ferreira da; MACÊDO, Ana Letícia Feitosa de; LUCENA, Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes; LUCENA, Luciana de Figueirêdo Lopes. Determinação da ativação relativa do ligante RAP e avaliação da interferência de aditivos de reciclagem em misturas asfálticas

produzidas com 100% RAP. **Transportes**, v. 31, n. 3, p. 1-20, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.58922/transportes.v31i3.2805>. Acesso em: 17 fev. 2025.

DAVE, E, V., BUTTLAR, W, G., PAULINO, G, H. Asphalt Pavement Aging and Temperature Properties through a Functionally Graded Viscoelastic Model, Part-II: Application. *Material Science Forum* Vols. 631-632. Pp 53-58. **Trans Tech Publications**, Switzerland, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 095/2006 – EM. **Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 159/2011-ES. **Pavimentos asfálticos – Fresagem a frio – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2011

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 178/2018 - PRO: Pavimentação asfáltica – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento. Rio de Janeiro: DNIT, 2018. Disponível em: GOV.BR. Acesso em: 16 fev. 2025.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA. **Pavement Recycling Executive Summary and Report**. U.S. Department of Transportation, FHWA-SA-95-060, Washington, D.C. Março, 1996.

GUO, M., LIU, H., JIAO, Y., MO, L., TAN, Y., WANG, D., & LIANG, M. (2020). Effect of WMA-RAP technology on pavement performance of asphalt mixture: A state-of-the-art review. **Journal of Cleaner Production**, 121704. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121704.

LI, Mingchen; HAN, Zhanchuang; CHENG, Huailei; YANG, Ruikang; YUAN, Jiang; JIN, Tian. Low-temperature performance improvement strategies for high RAP content recycled asphalt mixtures: focus on rap gradation variability and mixing process. **Fuel**, [S.L.], v. 387, p. 134362, maio 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134362>.

LIMA, Thayse Nunes de. **Reuso de Asfalto na Fabricação de CBUQ- Revisão de Literatura**. 2020. 42 f. TCC (Bacharelado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharias e Tecnologias, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, 2020.

LO PRESTI, D.; K. VASCONCELOS; M. OREŠKOVIĆ et al. (2019) On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents. **Road Materials and Pavement Design**, v. 21, n. 8, p. 2071-90. DOI: 10.1080/14680629.2019.1607537.

LOPES, Ana Flavia Davanzo; SAVASINI, Kamilla Vasconcelos; ALMEIDA, Mario Sergio de Souza; BERNUCCI, Liedi Legi Bariani. Geração e utilização do RAP no Brasil. **Revista ENINFRA**, Brasília, v. 3, n. 3, p. 201-217, nov. 2024. DOI: <https://doi.org/10.70859/2764-9539.v3.n3.126>.

LOPES, Ana Flavia Davanzo; VASCONCELOS, Kamilla; LINHARES, Guilherme. Mistura asfáltica reciclada a quente produzida em laboratório e em usina – Análise do ligante e da mistura. **Anais ANPET 2023**, 2023. Disponível em: <https://proceedings.science/p/174684?lang=pt-br>. Acesso em: 17 fev. 2025.

MASTERPLATE. 2021. **Diferença entre pavimento rígido e flexível**. Disponível em: <<https://masterplate.com.br/diferenca-entre-pavimento-rigido-e-flexivel/>>. Acesso em: 04 de Mar. 2025

MEDEIROS, Sayonara Andrade de. **Incorporação do lodo de tanque séptico como matéria-prima de uma mistura asfáltica**. 2006. 105 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Sanitária, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

NASCIMENTO, Maria das Vitórias do. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas**. 2011. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2011. p. 176.

OTAVIANO, Fábio César Maximiano; BARBOSA, Maria Teresa Gomes; NASCIMENTO, Luis Alberto Herrmann do. **Avaliação do desempenho em misturas asfálticas recicladas a quente com a incorporação de ligantes convencional e modificado por polímero**. Enarc: Foz do Iguaçu - 2023, [s. l], v. 1, n. 8, p. 1-6, jan. 2023. Semestral.

PASETTO, M., BALIELLO, A., GIACOMELLO, G., & PASQUINI, E. (2021). Towards very high RAP content asphalt mixes: A comprehensive performance-based study of rejuvenated binders. **Journal of Traffic and Transportation Engineering** (English Edition). DOI: 10.1016/j.jtte.2020.12.007

SEGUNDO, Iran Gomes da Rocha; BRANCO, Verônica Teixeira Franco Castelo; VASCONCELOS, Kamilla L.; HOLANDA, Áurea Silva de. **Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado**. Transportes, [S.L.], v. 24, n. 4, p. 85, 1 dez. 2016. Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo. <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v24i4.1148>.

SEGUNDO, Iran Gomes da Rocha; CASTELO BRANCO, Verônica Teixeira Franco; VASCONCELOS, Kamilla L. ; HOLANDA, Áurea Silva de. Misturas Asfálticas Recicladas a Quente com Incorporação de Elevado Percentual de Fresado Como Alternativa para Camada de Módulo Elevado. **Transportes**, v. 24, n. 4, p. 85-94, 2016. Disponível em: <http://doi.org/10.14295/transportes.v24i4.1148>. Acesso em: 17 fev. 2025.

SENÇO, Wlastermiller. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2ª ed. São Paulo: PINI, 2007. SOUSA, Renan Javian Neco de. **O pavimento de concreto nas cidades**. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2014.

SUZUKI, Karina Yuriko. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado**. 2019. Dissertação (Mestre em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. p. 155.

WIRTGEN GRUOP. 2025 **Fresagem a frio | Tecnologia | Wirtgen**. Disponível em: <<https://www.wirtgen-group.com/pt-br/produtos/wirtgen/tecnologias/fresadoras-a-frio/>>. Acesso em: 4 mar. 2025.

ZHAO, Wenbin. The effects of fundamental mixture parameters on hot-mix asphalt performance properties. **Tigerprints**, Clemson, v. 1, n. 1, p. 1-187, 2011.

APÊNDICE - A

Quadro 6: Resultados individuais obtidos das amostras das misturas asfálticas.

Mistura	Amostra	Gmb (%)	MD (Gmb)	Vv(%)	MD (Vv)	VCB (%)	MD (VCB)	VAM (%)	MD (VAM)	RBV	MD (RBV)	RT (Mpa)	MD(RT)
A	C`	2,34	2,34	4,31	4,21	11,37	11,38	15,68	15,60	0,73	0,73	0,90	0,93
	C``	2,34		4,10		11,40		15,49		0,74		0,94	
	C```	2,34		4,21		11,38		15,60		0,73		0,93	
B	CP1	2,31	2,31	5,34	5,34	11,23	11,23	16,57	16,57	0,68	0,68	0,65	0,65
	CP2	2,30		5,46		11,22		16,68		0,67		0,61	
	CP3	2,31		5,26		11,24		16,50		0,68		0,69	
	CP4	2,31	2,32	5,04	4,86	11,27	11,29	16,31	16,15	0,69	0,70	0,76	0,76
	CP5	2,32		4,86		11,29		16,15		0,70		0,76	
	CP6	2,32		4,75		11,30		16,05		0,70		0,80	
C	CP7	2,39	2,39	5,65	5,65	11,66	11,66	17,31	17,31	0,67	0,67	0,59	0,59
	CP8	2,39		5,75		11,65		17,40		0,67		0,59	
	CP9	2,40		5,57		11,67		17,24		0,68		0,61	
	CP10	2,40	2,40	5,42	5,30	11,69	11,70	17,11	17,01	0,68	0,69	0,63	0,65
	CP11	2,40		5,30		11,70		17,01		0,69		0,65	
	CP12	2,40		5,27		11,71		16,98		0,69		0,67	
D	CP13	2,30	2,30	6,01	5,92	11,18	11,19	17,19	17,11	0,65	0,65	0,51	0,53
	CP14	2,30		5,85		11,24		17,05		0,66		0,55	
	CP15	2,30		5,92		11,19		17,11		0,65		0,53	
	CP16	2,31	2,31	5,55	5,42	11,23	11,25	16,78	16,67	0,67	0,67	0,61	0,62
	CP17	2,31		5,33		11,26		16,59		0,68		0,64	
	CP18	2,31		5,42		11,25		16,67		0,67		0,62	
E	CP19	2,30	2,30	6,23	6,23	11,19	11,19	17,42	17,42	0,64	0,64	0,50	0,50
	CP20	2,30		6,11		11,20		17,38		0,64		0,53	
	CP21	2,30		6,35		11,18		17,53		0,64		0,50	
F	CP22	2,31	2,31	6,11	6,11	11,22	11,22	17,32	17,32	0,65	0,65	0,51	0,54
	CP23	2,31		6,16		11,21		17,37		0,65		0,54	
	CP24	2,32		5,99		11,23		17,22		0,65		0,57	

Fonte: Autoria própria (2025)