

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DE CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ÂNGELA BECK ALIANO

**A INFLUÊNCIA DA PROPORÇÃO DE MATERIAL FRESADO NA MISTURA
ASFÁLTICA**

CAXIAS DO SUL, RS

2025

ÂNGELA BECK ALIANO

**A INFLUÊNCIA DA PROPORÇÃO DE MATERIAL FRESADO NA MISTURA
ASFÁLTICA**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof Dr Vinicio Cecconello

CAXIAS DO SUL, RS

2025

ÂNGELA BECK ALIANO

**A INFLUÊNCIA DA PROPORÇÃO DE MATERIAL FRESADO NA MISTURA
ASFÁLTICA**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 04 / 12 / 2025

Banca Examinadora

Prof. Dr. Vinício Cecconello

Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Matheus Poletto

Universidade de Caxias do Sul

Esp. Pamela Costi Roglio

CSG - Concessionária Caminhos da Serra Gaúcha

RESUMO

ALIANO, ÂNGELA. **A influência da proporção de material fresado na mistura asfáltica**. Caxias do Sul, 2025. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2025.

A utilização de pavimentos asfálticos reciclados tem ganhado destaque por representar uma solução sustentável, econômica e alinhada às práticas modernas de engenharia rodoviária. O presente trabalho buscou avaliar o comportamento da mistura asfáltica com a adição de diferentes proporções de Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP). O RAP, um resíduo da fresagem de pavimentos, é uma alternativa eficiente em termos econômicos e de uso de novos materiais, mas pesquisas indicam que sua dosagem excessiva pode levar à perda de flexibilidade e ao aumento da suscetibilidade à formação de trincas por fadiga. O objetivo geral foi avaliar o desempenho da mistura, analisando suas propriedades mecânicas. A metodologia incluiu a caracterização completa do material fresado (granulometria e teor de ligante) e a produção de misturas asfálticas com proporções de 0% (referência), 10% e 20% de substituição de agregados virgens por RAP. Essas misturas foram submetidas a ensaios laboratoriais de estabilidade, fluência e Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD). O estudo mostrou que a adição de RAP modifica de forma significativa o comportamento das misturas asfálticas. As análises de estabilidade, fluência e resistência à tração indicaram que 10% de RAP tende a reduzir o desempenho mecânico, já que essa quantidade não é suficiente para melhorar a rigidez e a coesão da mistura. Por outro lado, 20% de RAP aumentou a estabilidade e a resistência à tração, refletindo maior rigidez devido ao ligante envelhecido presente no material fresado. Apesar disso, o aumento da rigidez pode reduzir a deformabilidade e afetar a durabilidade do pavimento. Assim, concluiu-se que teores mais elevados de RAP podem melhorar algumas propriedades, mas exigem ajustes no teor de ligante virgem e, possivelmente, o uso de rejuvenescente para manter o equilíbrio entre resistência, flexibilidade e desempenho em longo prazo.

Palavras-chave: Material Fresado. Incorporação. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

ALIANO, ÂNGELA. The influence of the proportion of fresh material in the asphalt mixture. Caxias do Sul, 2025. Undergraduate Thesis in Civil Engineering, University of Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2025.

The use of recycled asphalt pavements has gained prominence as a sustainable, economical, and certified solution for modern road engineering practices. This study aimed to evaluate the behavior of asphalt mixtures with the addition of different proportions of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). RAP, a residue from pavement milling, is an efficient alternative in terms of economics and the use of new materials, but research indicates that its excessive dosage can lead to loss of flexibility and increased susceptibility to fatigue cracking. The overall objective was to evaluate the performance of the mixture by analyzing its mechanical properties. The methodology included the complete characterization of the milled material (granulometry and binder content) and the production of asphalt mixtures with proportions of 0% (reference), 10%, and 20% replacement of virgin aggregates with RAP. These mixtures were subjected to laboratory tests of stability, creep, and Diametral Compression Tensile Strength (DCTS). The study showed that the addition of RAP significantly modifies the behavior of asphalt mixtures. Stability, creep, and tensile strength analyses indicated that 10% RAP tends to reduce mechanical performance, as this amount is insufficient to improve the stiffness and cohesion of the mixture. On the other hand, 20% RAP increased stability and tensile strength, reflecting greater stiffness due to the aged binder present in the milled material. Despite this, the increased stiffness may reduce deformability and affect pavement durability. Thus, it is concluded that higher RAP contents can improve some properties, but require adjustments to the virgin binder content and possibly the use of a rejuvenating agent to maintain a balance between strength, flexibility, and long-term performance.

Keywords: Milled Material. Embedding. Mechanical Properties.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família — minha mãe Liane, meu pai Angelo e minhas irmãs Layne e Gabriela — pelo apoio durante todo o período do curso.

Ao meu orientador Vinício Cecconello, pelas orientações, sugestões e ensinamentos não apenas durante o período de desenvolvimento do trabalho, como também ao longo de toda a graduação.

Aos meus amigos e colegas de curso, Paulo, Nicolas e Maykelvin, agradeço a parceria, amizade ao longo de todos os anos da graduação.

Por fim, agradeço à empresa CSG pelo fornecimento do material necessário para o desenvolvimento deste estudo, como também todos os ensinamentos e auxílio do Engenheiro Ademilson e técnico de laboratório Jonas.

De forma geral, deixo meu agradecimento a todos que estiveram ao meu lado e me apoiaram durante minha formação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do programa experimental	23
Figura 2 - Curvas granulométricas dos agregados naturais (%/mm)	26
Figura 3 - RAP em formato de cartucho no papel filtro	28
Figura 4 - Aparelho de Soxhlet montado	28
Figura 5 - Curva granulométrica do RAP (%/mm)	30
Figura 6 - Curva granulométrica dos agregados naturais e RAP (%/mm)	30
Figura 7 - Mistura asfáltica pronta para ser compactada	34
Figura 8 - CP desmoldado	35
Figura 9 - Densidades da mistura referência	40
Figura 10 - Estabilidade da mistura referência	41
Figura 11 - Fluência da mistura referência	42
Figura 12 - Resistência a tração por compressão diametral da mistura referência	43
Figura 13 - Resultados obtidos de densidade com diferentes adições de RAP	44
Figura 14 - Resultados obtidos de estabilidade com diferentes adições de RAP	46
Figura 15 - Resultados obtidos de fluência com diferentes adições de RAP	48
Figura 16 - Resultados obtidos de tração com diferentes adições de RAP	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Autores e porcentagens utilizadas para estudos.....	20
Tabela 2 - Propriedades obtidas por Centovante et al. (2018).....	20
Tabela 3 - Propriedades obtidas por Luzzi et al. (2018).....	21
Tabela 4 - Propriedades do CAP.....	24
Tabela 5 - Propriedades dos agregados naturais.....	25
Tabela 6 - Massa mínima por amostra de ensaio.....	25
Tabela 7 - Metodologia aplicada para a realização da caracterização do fresado.....	27
Tabela 8 - Quantidade de CPs moldados.....	31
Tabela 9 - Proporções de material utilizado na moldagem dos CPs.....	32
Tabela 10 - Metodologias para ensaios.....	36

LISTA DE SIGLAS

RAP - Pavimento Asfáltico Recuperado

NBR - Norma Brasileira

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

RTCD – Resistência a Tração por Compressão Diametral

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Objetivo Geral	12
1.2. Objetivos específicos	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1. Pavimentação asfáltica	13
2.2. Ligante Asfáltico	14
2.3. Material fresado e processo de fresagem de pavimentos	15
2.3. Reciclagem do Pavimento e Reutilização de Material Fresado em Misturas Asfálticas	17
2.4. Atuação dos Agentes Rejuvenescedores na mistura reciclada	19
2.5. Influência da Proporção de RAP nas Misturas Asfálticas	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1. MATERIAIS	24
3.1.1. Ligante Asfáltico	24
3.1.2. Agregados naturais	25
3.1.3. Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP)	26
3.2. MÉTODOS	31
3.1.1. Curva Granulométrica das composições	32
3.2.1. Produção dos corpos de prova	33
3.2.2. Ensaio	35
3.2.2.1. Massa específica e densidade relativa máxima de misturas asfálticas	36
3.2.4.4. Resistência à tração por compressão diametral	37
3.2.4.2. Estabilidade e Fluência	39
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	40
4.1. Teor ótimo de ligante	40
4.2. Densidades das amostras ensaiadas	44
4.1. Estabilidade das amostras ensaiadas	46
4.1. Fluência das amostras ensaiadas	48
4.1. Resistência a tração por compressão diametral das amostras ensaiadas	49
5. CONCLUSÃO	51
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1. INTRODUÇÃO

O material fresado corresponde ao resíduo proveniente de fresagem de pavimentos asfálticos, ele é composto pelos mesmos materiais que integravam o pavimento original, porém já submetidos aos efeitos do envelhecimento e das solicitações ao longo de sua vida útil.

Em comparação a outros materiais de engenharia, o pavimento asfáltico apresenta uma vida útil menor e, por isso, deve-se utilizar técnicas de manutenção mais elaboradas como, por exemplo, a fresagem e a reciclagem de pavimentos (Centovante et al. 2018).

O processo de fresagem baseia-se no corte ou desbaste de uma ou mais camadas de pavimento, a fim de produzir uma superfície de textura uniforme, bastante utilizado em vias onde há a presença de remendos de má qualidade, corrugações, deformações plásticas, trincas e demais defeitos que uma via com tráfego intenso possa apresentar (Bonfim, 2017).

A incorporação de material fresado (RAP) na mistura asfáltica vem sendo apresentado como uma alternativa eficiente quando se fala em redução no âmbito econômico, de uso de novos materiais e o aumento na capacidade de carga. (Rocha, 2016). Alguns ensaios são realizados quando há comparação de eficiência no uso do material como o módulo de resiliência (MR), estabilidade, fluência, resistência à tração por compressão diametral (RTCD), deformação permanente, fadiga, suscetibilidade térmica, teor de ligante e desgaste.

Centovante (2018) analisou rigidez nos CPs com substituição de parte dos agregados por RAP, e observou um gradual aumento na rigidez do material com a inserção do material fresado, a autora ainda atribuiu esse fato ao processo de envelhecimento sofrido pelo ligante presente no material reutilizado, fazendo com que o material fique mais duro e quebradiço. No estudo de Luzzi, F. (2021) também observou acréscimo de valores em função do percentual de RAP incorporado nas misturas analisadas, no que diz a respeito do módulo de resiliência e teste de tração.

O ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) foi realizado por Siqueira (2021) com misturas contendo 50% de RAP, a resistência atingiu os requisitos normativos, porém o autor ressaltou a importância de controlar o envelhecimento do ligante para evitar a fragilidade do material.

Diversas pesquisas indicam a eficácia da incorporação de (RAP) nas misturas asfálticas, no entanto, é fundamental a dosagem adequada desse material, pois o seu uso excessivo pode resultar na perda de flexibilidade, aumento a suscetibilidade à formação de trincas por fadiga no pavimento, e outras consequências indesejadas. Visto isso, busca-se a dosagem ideal do material fresado na mistura, a fim de obter um produto que atenda todas as necessidades de um tráfego intenso em rodovias.

Para isso, será realizado um conjunto de etapas que inclui inicialmente a caracterização completa do material fresado, abrangendo análises de granulometria e teor de ligante asfáltico. Em seguida, serão produzidas misturas asfálticas com diferentes proporções de RAP, as quais passarão por ensaios laboratoriais de densidade, volume de vazios, estabilidade, fluência e resistência à tração. Os resultados obtidos serão então comparados aos de uma mistura de referência, permitindo avaliar o impacto de cada porcentagem de RAP no desempenho final

1.1. Objetivo Geral

Avaliar o comportamento da mistura asfáltica com adição de diferentes proporções de RAP, visando a maior eficiência da mistura.

1.2. Objetivos específicos

- a) Identificar teor ideal de ligante baseado na variação do teor de RAP da mistura referência;
- b) Analisar as densidades das amostras ensaiadas;
- c) Analisar comportamento das amostras quanto a estabilidade e fluência;
- d) Analisar comportamento das amostras quanto a resistência a tração por compressão diametral;
- e) Análise comparativa dos resultados obtidos das diferentes proporções de 0, 10 e 20% de RAP com os de uma mistura de referência, identificando possíveis variações de desempenho.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Para compreender a influência da proporção de RAP na mistura asfáltica, torna-se essencial compreender os conceitos, características, normativas e estudos anteriores sobre o comportamento da mistura. Esta fundamentação, portanto, reúne os principais referenciais teóricos que sustentam a análise proposta, estabelecendo as bases para a discussão dos resultados obtidos.

2.1. Pavimentação asfáltica

O pavimento asfáltico flexível é constituído por múltiplas camadas, composta por reforço de subleito, sub-base, base e revestimento, sendo que essa é responsável por resistir diretamente aos esforços gerados pelo tráfego e impermeabilizar as camadas subsequentes (Bernucci et al. 2010).

Os pavimentos são classificados em 3 categorias, sendo elas, flexível, rígida e semirrígida. De acordo com o DNIT (2016), o pavimento flexível é aquele que todas as camadas sofrem deformação elástica sob um carregamento aplicado, sendo que a carga se distribui em parcelas equivalentes entre as camadas. Já o pavimento rígido, é aquele que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores, portanto absorve, praticamente, todas as tensões provenientes do carregamento aplicado, um exemplo são as placas de concreto de cimento Portland. O pavimento semirrígido trata-se de um tipo híbrido de pavimento, que combina as características de pavimentos flexíveis e rígidos, é quando a camada de revestimento asfáltico é executada sobre a camada de base cimentada.

As propriedades físicas do asfalto se baseiam diretamente à sua temperatura, em temperaturas muito baixas, as moléculas não têm condições de se mover umas em relação às outras e a viscosidade fica muito elevada; nessa situação o ligante se comporta quase como um sólido. À medida que a temperatura aumenta, algumas moléculas começam a se mover, podendo mesmo haver um fluxo entre as moléculas. O aumento do movimento faz baixar a viscosidade e, em temperaturas altas, o ligante se comporta como um líquido. Essa transição é reversível (DNIT, 2006).

Quando o pavimento se aproxima do fim da sua vida útil, são necessários reparos e manutenções mais frequentes a fim de garantir boas condições do

pavimento. Segundo Bernucci et al (2008), antes de definir as técnicas a serem utilizadas deve-se conhecer as condições do pavimento, para a definição das técnicas de recuperação mais adequadas para cada situação. Silva, D. (2018) ainda cita como as principais patologias identificadas nos pavimentos asfálticos tratando-se das fendas, fissuras, trincas, afundamentos, ondulações ou corrugação, escorregamentos, exsudação, desgastes, “panelas” e remendos. Uma das técnicas sugeridas para a manutenção e correção de diversas patologias do pavimento é o processo de fresagem. Raab, et al (2009) destaca que a degradação da superfície asfáltica ocorre devido à exposição contínua a intempéries, principalmente radiação UV e ciclos de umidade-secura, que aceleram o envelhecimento do ligante. Isso explica o aumento da necessidade de manutenção próximo ao final da vida útil.

Além das classificações tradicionais dos pavimentos, estudos internacionais reforçam que o desempenho estrutural das camadas asfálticas está diretamente ligado ao comportamento viscoelástico do material. Segundo Brown e Cross (1992), as misturas asfálticas respondem ao carregamento de maneira dependente da temperatura e da taxa de aplicação de carga, o que explica variações significativas na resistência à deformação permanente e na suscetibilidade ao trincamento. Ainda, Huang (2004) destaca que a durabilidade do pavimento está associada à correta seleção do tipo de mistura e das características do ligante, de modo que a interação entre temperatura, tráfego e propriedades mecânicas da mistura define a vida útil do revestimento.

2.2. Ligante Asfáltico

Um ligante asfáltico pode ser definido como o material responsável por promover a coesão e a aderência entre as partículas minerais em uma mistura asfáltica, desempenhando papel fundamental na impermeabilização e na resistência mecânica do revestimento. De acordo com Bernucci et al. (2010), trata-se de um material de natureza viscoelástica, derivado do refino do petróleo, cuja resposta mecânica varia em função da temperatura e do tempo de carregamento, tornando-se mais fluido em temperaturas elevadas e mais rígido em temperaturas baixas. Conforme ressaltam Silva et al. (2019), o ligante asfáltico atua como elemento aglutinante dos agregados, garantindo coesão interna, durabilidade e flexibilidade à

mistura. Para Motta et al. (2017), a qualidade e o tipo de ligante empregado influenciam diretamente o desempenho, a vida útil e a resistência às deformações permanentes do pavimento, sendo, portanto, um dos componentes mais relevantes no projeto e na execução de misturas asfálticas.

O ligante asfáltico, além de apresentar comportamento viscoelástico, sofre alterações químicas ao longo do tempo devido ao processo de envelhecimento oxidativo. Conforme descrito por Petersen (2009), o envelhecimento ocorre tanto durante o processo de usinagem (envelhecimento de curto prazo) quanto ao longo dos anos de serviço (envelhecimento de longo prazo), resultando no endurecimento do material. Essa alteração química impacta diretamente o desempenho das misturas contendo RAP, uma vez que o ligante envelhecido tende a aumentar a rigidez e reduzir a flexibilidade da mistura. Kim e Daniel (2005) ainda demonstram que misturas com teores elevados de ligante envelhecido apresentam menor capacidade de relaxamento, o que pode intensificar o aparecimento de trincas por fadiga ou retração térmica.

2.3. Material fresado e processo de fresagem de pavimentos

O DAER define o material fresado como o material resultante da técnica de fresagem. O RAP mais conhecido no Brasil como asfalto fresado, é o material proveniente do processo de fresagem de pavimentos asfálticos. A fresagem corresponde a um processo mecânico no qual se faz o corte ou desbaste da superfície asfáltica a uma profundidade pré-estabelecida, a fim de realizar manutenções no pavimento. Esse corte é realizado por uma máquina fresadora que raspa o asfalto com auxílio de um cilindro dentado, denominado cilindro fresador (Câmara, 2019)

O RAP é constituído pelos mesmos materiais que compõem o revestimento asfáltico, ou seja, areia, brita e cimento asfáltico de petróleo, porém as características físicas do material variam de acordo com o processo de fresagem realizado, podendo ser classificado como a frio, a quente, processamento em usina ou in situ.

A fresagem a frio é realizada em temperatura ambiente, sem pré-aquecimento do revestimento asfáltico. Esse processo é utilizado com a adição de um ligante a este material fresado, formando uma mistura apta a constituir uma nova camada de base (Câmara, 2019). Diferentemente da fresagem a quente, onde é efetuado um

pré-aquecimento do revestimento, o processo é similar, porém pelo fato da estrutura estar aquecida, a camada oferece pouca resistência ao corte, havendo uma escarificação da camada. A reciclagem a quente em usina trata-se do processo de fresagem a frio, o material retirado é transportado até a usina para ser reciclado, após o processo de reciclagem o material é colocado na pista, espalhado e compactado.

Uma das limitações do processo de reciclagem do pavimento asfáltico é a variabilidade do material. A heterogeneidade do material se dá não somente na granulometria do material, como também no teor de ligante final e na idade do ligante envelhecido (Arlima, 2016). Segundo Zubaran (2014), o envelhecimento do ligante presente no material fresado é o processo pelo qual suas propriedades químicas e reológicas sofrem uma alteração, o que resulta em um ligante mais consistente. Todo esse processo ocorre durante a vida útil do ligante, desde a sua estocagem até a aplicação na mistura, prosseguindo ao longo do tempo de serviço do pavimento. Entretanto, ainda segundo Zubaran (2014), quando a fonte é de um único projeto, o material apresenta graduação e teor de ligante quase que constantes, o autor ainda cita como um método eficaz para homogeneização de fresado de diferentes fontes, o destorroamento do material, quando bem trabalhadas as pilhas de estocagem de fresados asfálticos, podem apresentar uma graduação menos variável. Já quanto ao teor de ligante, Lopes (2015) afirma que a distribuição do ligante asfáltico de uma mistura entre seus grãos ocorre segundo a superfície específica dos mesmos, entendendo assim que, entre o material mais fino e graúdo da mistura, o fino é a parte onde se encontra o maior teor de ligante, pois é a parte que possui a maior superfície específica, fato esse que corrobora com a afirmação de Zubaran referente a necessidade de destorroamento e fracionamento do fresado com o objetivo de aumentar o controle durante a dosagem.

O material fresado pode ser utilizado de três formas, podendo ser utilizado em sua forma natural, com o objetivo de tapar buracos, por exemplo, ou ainda, na reutilização desse material sendo incorporado em misturas para as camadas granulares, em que o RAP é misturado com o solo e, de acordo com as características mecânicas, pode ser aplicado em camadas de base ou sub-base; na reciclagem desse material sendo incluído na composição de um novo revestimento asfáltico, em que o RAP é tratado com agentes rejuvenescedores, agregados e ligantes novos, sofrendo uma transformação, para então ser aplicado em uma nova camada de rolamento (Pessoni, 2021).

A variabilidade do RAP, já mencionada, também é discutida por Copeland (2011), que destaca que a distribuição do teor de ligante e a granulometria do fresado dependem tanto das características originais do pavimento quanto da profundidade e tipo de fresagem realizada. Por esse motivo, práticas adequadas de estocagem, destorroamento e fracionamento são fundamentais para reduzir a heterogeneidade do material. West et al. (2013) reafirmam que a segregação do fresado nas pilhas de estoque é uma das principais causas de inconsistência na dosagem, sendo recomendada a adoção de técnicas como formação de pilhas em “camadas horizontais” e mistura periódica do material.

Outro aspecto relevante refere-se aos mecanismos de endurecimento do ligante presente no RAP. Segundo Robertson (2000), o envelhecimento sofre influência da exposição prolongada ao oxigênio, temperatura e radiação ultravioleta, fatores que explicam a elevada rigidez observada no material fresado, que por sua vez impacta diretamente o comportamento da mistura reciclada.

2.3. Reciclagem do Pavimento e Reutilização de Material Fresado em Misturas Asfálticas

A reciclagem consiste na reutilização dos materiais que compõem o pavimento. É uma técnica em que uma parte ou toda a estrutura do pavimento é reaproveitada na construção de um novo pavimento, podendo haver ou não a incorporação de outros materiais (Silva, 2020). A reciclagem apresenta-se como uma solução para muitos problemas, além de oferecer várias vantagens em relação à utilização convencional de materiais virgens, como a conservação de agregados, ligantes e de energia, preservação do meio ambiente e a restauração das condições geométricas existentes (DNIT, 2006). Conforme preceitua a legislação ambiental, deve-se evitar a produção de resíduos e, no caso de sua geração, deve ser priorizada, a redução de geração, a reutilização, a reciclagem e a destinação final, nesta ordem. O emprego da técnica de fresagem do revestimento asfáltico, através do processo de corte e remoção da camada deteriorada, está previsto no catálogo de intervenções de restauração das vias. O material removido deve, sempre que possível, ser reutilizado. O material fresado é classificado como um resíduo não perigoso e inerte, Classe II-B, conforme a norma ABNT NBR 10004:2004. Pode ainda ser classificado baseado no

CONAMA n° 307/2002, como um resíduo de construção civil enquadrado na Classe A, ou seja, resíduos reutilizáveis ou recicláveis.

A operação de fresagem do revestimento asfáltico pode ser seguida de reinserção dos resíduos gerados no processo de produção de novas misturas asfálticas. A reciclagem da camada de revestimento asfáltico ocorre ao adicionar o RAP à mistura asfáltica nova, de modo que o material fresado reciclado, os agregados e o ligante ofereçam desempenho semelhante ao emprego original (Melo Neto, 2022).

O processo de incorporação do RAP na mistura asfáltica envolve algumas etapas que visam garantir sua qualidade e desempenho da mistura final. Em primeiro momento, é realizada a coleta e processamento do RAP, garantindo a remoção de impurezas e estocagem correta do material, seguido da caracterização do material, em laboratório, para determinação de teor de ligante residual, granulometria dos agregados, propriedades do ligante, finalizada a caracterização é realizada a dosagem da mistura, o RAP é incorporado como componente parcial da mistura, ou seja, ele substitui parte dos agregados virgens e parte do ligante asfáltico, após a dosagem e incorporação do material na mistura garantindo uma mistura homogênea, é feito o transporte e aplicação do material.

A incorporação do RAP no processo de reciclagem também envolve a avaliação da compatibilidade entre o ligante envelhecido e o ligante virgem. De acordo com McDaniel e Anderson (2001), a difusão entre esses dois ligantes não é instantânea; trata-se de um processo que ocorre gradualmente e depende da temperatura, viscosidade e tempo de mistura. Por essa razão, em teores elevados de RAP, é comum a necessidade de utilização de rejuvenescedores, que têm a função de restaurar as propriedades reológicas do ligante envelhecido. Zofka, et al. (2016) afirmam que a introdução desses aditivos melhora a mobilidade molecular e favorece a compatibilidade, resultando em misturas mais homogêneas e com comportamento mecânico mais equilibrado.

Além disso, a reciclagem com uso de RAP é amplamente reconhecida como prática ambientalmente vantajosa. Mogawer, et al. (2012) apontam que misturas com RAP reduzem o consumo energético e as emissões de CO₂ durante o ciclo de vida do pavimento, reforçando a importância da técnica dentro dos princípios de economia circular e sustentabilidade adotados pelo setor rodoviário.

2.4. Atuação dos Agentes Rejuvenescedores na mistura reciclada

Os agentes rejuvenescedores são aditivos empregados em misturas asfálticas com incorporação de RAP com o objetivo de restaurar as propriedades reológicas do ligante asfáltico envelhecido presente no material fresado. Ao longo da vida útil do pavimento, o ligante sofre processos de oxidação e volatilização dos componentes mais leves, resultando em aumento de rigidez e perda de ductilidade, o que pode comprometer o desempenho da mistura reciclada se não houver tratamento adequado (Bernucci et al., 2010).

A principal função dos agentes rejuvenescedores é repor os constituintes leves do ligante, reduzindo sua viscosidade e promovendo maior flexibilidade. Esse processo favorece a compatibilização entre o ligante envelhecido do RAP e o ligante virgem, contribuindo para uma mistura mais homogênea e com comportamento mecânico mais equilibrado (Motta et al., 2017).

O uso desses aditivos é especialmente relevante em misturas com teores elevados de RAP, nas quais o aumento excessivo da rigidez pode resultar em maior suscetibilidade a trincamentos por fadiga e por retração térmica. A adição controlada de agentes rejuvenescedores melhora a trabalhabilidade da mistura, facilita a compactação e contribui para o desempenho estrutural do revestimento ao longo do tempo (Vasconcellos et al., 2014).

Os rejuvenescedores podem ter origem vegetal, mineral ou sintética, sendo aplicados diretamente ao RAP, ao ligante asfáltico ou durante o processo de usinagem, conforme a metodologia adotada em projeto. A definição da dosagem deve ser realizada com base em ensaios laboratoriais, de modo a restabelecer as propriedades desejadas do ligante sem provocar amolecimento excessivo, o que poderia aumentar a suscetibilidade à deformação permanente (Bernucci et al., 2010).

O uso adequado de agentes rejuvenescedores possibilita maior reaproveitamento do RAP, promovendo benefícios técnicos, econômicos e ambientais, alinhados aos princípios de sustentabilidade, sem prejuízo ao desempenho funcional e estrutural do pavimento asfáltico.

2.5. Influência da Proporção de RAP nas Misturas Asfálticas

Estudos testam a inserção de diferentes proporções de material fresado na mistura asfáltica. Para a análise e embasamento inicial para comparação, utilizou-se estudos de três diferentes autores, conforme a tabela 01.

Tabela 1 - Autores e porcentagens utilizadas para estudos

Autor	Porcentagem de RAP
CENTOFANTE, et al. (2018)	0, 10, 20 e 30%
LUZZI, et al (2021)	0, 10, 20 e 30%

Fonte: Autora (2025)

Um dos objetivos da incorporação do material fresado na mistura asfáltica é a economia de ligante asfáltico novo. No estudo de Centovante, et al (2018), o autor afirma que a utilização de fresado em misturas asfálticas gera uma economia de até 35% no teor de ligante adicionado, para misturas com adição de 30% de agregado reciclado, sem comprometer a qualidade da mistura.

Em termos de comportamento mecânico, o autor avaliou a rigidez e a resistência à tração em diferentes teores de incorporação de RAP. Os resultados são apresentados na tabela 02.

Tabela 2 - Propriedades obtidas por Centovante et al. (2018)

RAP (%)	VAM (%)	RBV (%)	RT (MPa)
0	17,3	76,8	1,42
10	15,0	74,0	1,79
20	16,0	65,0	2,08
30	14,5	75,0	2,36

Fonte: Adaptado de Centovante et al (2018)

A partir dos dados apresentados nota-se uma tendência de aumento na resistência à tração (RT) com o incremento do teor de RAP, passando de 1,42 MPa (sem RAP) para 2,36 MPa (com 30% de RAP), representando um ganho aproximado

de 65%. Esse comportamento reforça que o ligante envelhecido presente no material fresado contribui para maior rigidez da mistura.

O Volume de Vazios do Agregado Mineral (VAM) apresentou leve redução, o que sugere uma mistura mais densa e menos porosa, característica que pode ser positiva para resistência, mas requer atenção quanto à flexibilidade do revestimento, para evitar trincamentos em serviço.

Observa-se que a relação betume-vazios (RBV) apresentou uma variação relevante entre os teores analisados, com destaque para a redução observada na mistura com 20% de RAP, que atingiu o menor valor (65%), em comparação às demais, que se mantiveram entre 74% e 76%. Essa diminuição indica uma menor quantidade de ligante ativo preenchendo os vazios da mistura, possivelmente associada à heterogeneidade do material fresado e à distribuição irregular do ligante envelhecido presente no RAP. Apesar disso, nota-se que a resistência à tração continuou aumentando com o acréscimo de RAP, sugerindo que o ligante envelhecido contribuiu para o ganho de rigidez da mistura, ainda que tenha reduzido ligeiramente sua capacidade de recobrimento.

Luzzi et al. (2021) também analisaram a influência da incorporação de RAP nos teores de 10%, 20% e 30%, avaliando propriedades como estabilidade, fluência, módulo e vazios. Os resultados são mostrados na Tabela 03.

Tabela 3 - Propriedades obtidas por Luzzi et al. (2018)

RAP (%)	VAM (%)	RBV (%)	Vv (%)	M.E. máx. (kN/m ³)	M.E. apar. (kN/m ³)	Estabilidade (Kgf)	Fluência (kgF)
0	17,01	76,51	4,01	2,398	2,302	1467	11
10	16,09	75,27	3,96	2,393	2,299	1388	10
20	15,26	72,90	4,11	2,407	2,308	1658	10
30	13,04	68,46	4,05	2,432	2,329	1971	11

Fonte: Adaptado de Luzzi et al (2021)

Observa-se nas propriedades apresentadas pelo autor, uma redução gradual do Volume de Ar na Mistura (VAM) e da Relação Betume/Vazios (RBV) à medida que aumenta o teor de RAP, sugerindo uma maior densificação da mistura e menor

quantidade de ligante ativo preenchendo os vazios. Essa densificação contribui para a rigidez da mistura, como evidenciado pelo aumento do módulo de elasticidade máximo e aparente, bem como pela elevação expressiva da estabilidade Marshall, demonstrando maior resistência à deformação permanente. Ao mesmo tempo, pequenas variações no volume de vazios (Vv) e na fluência Marshall indicam que o aumento do RAP modifica a trabalhabilidade e a capacidade de recuperação da mistura após aplicação de carga, exigindo atenção no controle da dosagem.

Da mesma forma visto no estudo de Centovante, apesar da redução na RBV, que poderia indicar menor recobrimento do agregado e potencial redução da durabilidade, a mistura apresentou melhora significativa na rigidez e resistência à tração, especialmente nos teores de até 30% de RAP.

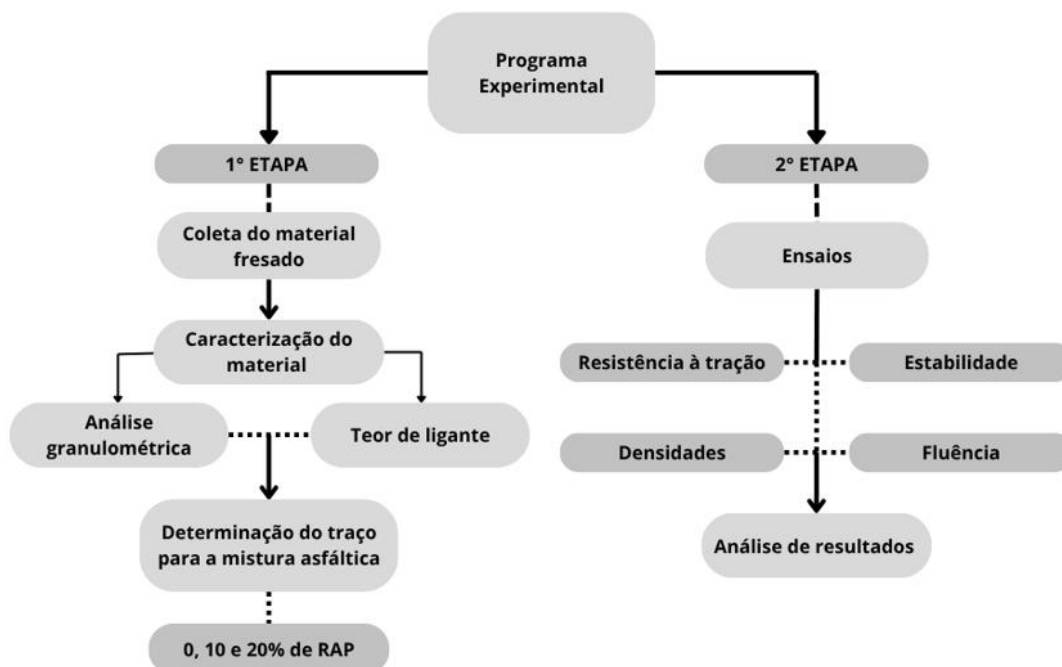
Com base nos estudos dos autores, concluímos que, a incorporação de RAP na mistura asfáltica exerce influência direta nas propriedades mecânicas do revestimento. Em teores moderados, entre 10% e 30%, observa-se uma elevação do módulo de rigidez e da resistência à tração, atribuída à presença do ligante envelhecido, que confere maior coesão à mistura (CENTOFANTE et al., 2018; LUZZI et al., 2021). Além disso, a trabalhabilidade da mistura diminui, exigindo maior controle durante a compactação e, em alguns casos, o uso de agentes rejuvenescedores para restabelecer parte das propriedades originais do ligante asfáltico.

Em termos de desempenho ao longo do tempo, estudos apontam que a utilização de RAP em proporções moderadas pode resultar em misturas com desempenho estrutural semelhante ou superior ao de misturas convencionais, com boa resistência à deformação permanente e manutenção das condições superficiais. No entanto, teores elevados podem potencializar a rigidez excessiva e aumentar a suscetibilidade a trincas por fadiga e retração térmica, reduzindo a vida útil do revestimento Luzzi et al., (2021). O controle da dosagem, a correta homogeneização do fresado e a aplicação de agentes rejuvenescedores são estratégias essenciais para mitigar esses efeitos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta etapa, são apresentados os materiais utilizados e os procedimentos adotados ao longo do desenvolvimento da pesquisa, conforme o fluxograma na figura 1. O objetivo foi avaliar como diferentes proporções de material fresado (RAP), podem influenciar o desempenho das misturas asfálticas. Para isso, foram selecionados os principais componentes da mistura, o agregado virgem, o ligante asfáltico e o próprio RAP. Também foram definidos os teores de incorporação do material fresado e realizadas as etapas de caracterização dos materiais, seguidas dos ensaios laboratoriais necessários para analisar o comportamento das misturas. Ressalta-se que a substituição foi efetuada em proporção massa por massa, considerando apenas os agregados. O ligante envelhecido existente no RAP não foi substituído, sendo o seu teor desconsiderado nos cálculos de substituição.

Figura 1 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: Autora (2025)

A seguir, cada um dos itens do fluxograma acima será abordado, com a devida explicação sobre como será realizada sua execução, destacando as etapas,

ferramentas utilizadas e critérios adotados para garantir a efetividade do processo metodológico.

3.1. MATERIAIS

A escolha dos materiais utilizados na confecção dos corpos de prova, assim como a compatibilidade entre eles, é fundamental para garantir o bom desempenho da mistura asfáltica. Para isso, é essencial que todos os materiais atendam às especificações estabelecidas pelas normas técnicas correspondentes, que definem os critérios de qualidade e controle exigidos para sua correta aplicação.

3.1.1. Ligante Asfáltico

O CAP empregado no estudo é um ligante modificado com borracha, o EcoFlex B, fornecido pela Greca Distribuidora de Asfaltos. De acordo com Bernucci et al. (2010), essa modificação proporciona ao ligante um comportamento viscoelástico mais complexo e estável, reduzindo sua sensibilidade às variações de temperatura e às deformações permanentes.

As características do material, conforme o fornecedor, são dadas abaixo, na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades do CAP

Ensaio	Especificação	Resultados
Penetração à 25°C (mm)	30 - 70	58
Ponto de amolecimento (°C)	mínimo 55	61
Viscosidade (cP)	800 - 2000	1607
Ponto de fulgor (°C)	mínimo 235	>240

Fonte: Adaptado Especificação Técnica Greca Asfaltos.

3.1.2. Agregados naturais

Os agregados naturais, grãos e miúdos, utilizados no estudo foram fornecidos pela Fabrita Mineração já com suas massas e densidades determinadas, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades dos agregados naturais

	Densidade Real (g/cm³)	Densidade Aparente (g/cm³)	Absorção (%)
Agregados Grãos	2,675	2,485	2,8
Agregados Miúdos	2,676	2,484	2,9

Fonte: Adaptado da Ficha Técnica da Fabrita.

Para a realização do estudo foi necessário a classificação do material natural quanto ao seu tamanho, a análise granulométrica, para a adequação na curva granulométrica da mistura.

A norma DNER-ME 83/98 estabelece o procedimento para o ensaio de peneiramento manual, o qual consiste na introdução do material na peneira de maior abertura, seguida pelo peneiramento sucessivo nas peneiras de menores aberturas, registrando-se as massas retidas em cada uma delas para a determinação dos resultados.

Os agregados naturais foram secos em estufa, no período de 24h antes da realização do ensaio. Para cada material foi separada uma quantidade distinta para realização do ensaio, de acordo com a determinação da NBR 7217, conforme a Tabela 6.

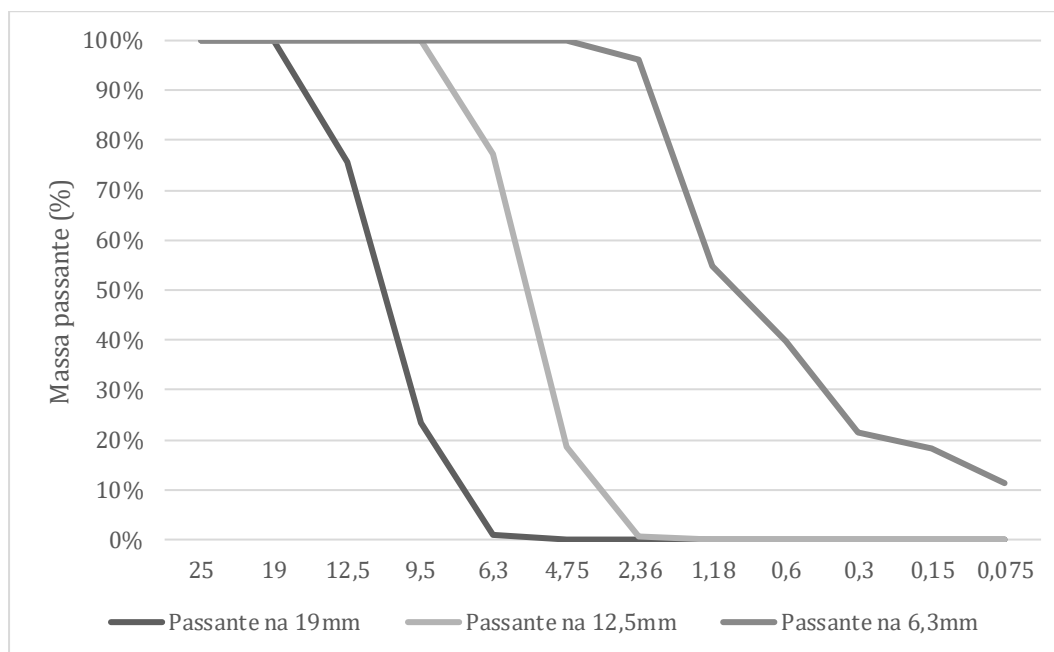
Tabela 6 - Massa mínima por amostra de ensaio

Material	Massa mínima da amostra (kg)
Retido na peneira 12,5mm	5
Retido na peneira 19mm	5
Passante na peneira 6,3mm	3

Fonte: Adaptado da NBR 7217

Com a amostra separada, foi submetida gradualmente à série de peneiras, com aberturas variando de 25 mm a 0,075 mm. Em seguida, realizou-se o peneiramento sucessivo, registrando-se a massa de material retida em cada peneira, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Curvas granulométricas dos agregados naturais (%/mm)



Fonte: Autora (2025)

Observa-se, pela curva granulométrica apresentada, que os agregados naturais analisados apresentam distribuição contínua dos tamanhos de partículas, com comportamento típico de materiais britados. Nota-se que o agregado retido na peneira de 19 mm possui predominância de partículas mais grossas, enquanto o material passante na peneira de 6,3 mm apresenta maior fração de finos. A diferença entre as curvas demonstra uma boa separação entre as faixas granulométricas, o que favorece o empacotamento dos grãos e contribui para uma mistura mais densa e estável.

3.1.3. Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP)

O material fresado utilizado neste estudo foi disponibilizado pela Concessionária Caminhos da Serra Gaúcha (CSG), proveniente da remoção mecânica de pavimentos asfálticos deteriorados, da rodovia ERS 122 Km 89. Sendo

o material armazenado em local seco e livre de umidade, fracionado em quantidades menores para garantir maior controle.

Em um primeiro momento, realiza-se a caracterização do material fresado, com o objetivo de compreender suas propriedades, tanto dos agregados quanto do ligante asfáltico residual, permitindo avaliar a melhor forma de aproveitamento desse material.

Essa caracterização baseia-se principalmente nas propriedades físicas do fresado. Inicialmente, o material é submetido à secagem em estufa a 60 °C, de modo a evitar possíveis alterações em suas características devido à exposição ao calor.

Caracteriza-se o material fresado, inicialmente, pela separação dos materiais (agregados e ligantes), para que, dessa forma, seja possível verificar quais os materiais constituintes da mistura e suas respectivas quantidades. Sendo assim, o processo de caracterização envolve duas etapas, sendo elas, a determinação do teor de ligante asfáltico e a análise granulométrica, a Tabela 7 apresenta a metodologia aplicada para a caracterização do material fresado.

Tabela 7 - Metodologia aplicada para a realização da caracterização do fresado

Ensaio	Metodologia
Teor de ligante asfáltico	DNIT 158/2011 - ME
Análise granulométrica	DNER-ME 83/98

Fonte: Autora (2025)

A DNIT 158/2011 - ME, descreve a aparelhagem, os procedimentos para a execução do ensaio e a fórmula para obtenção do resultado. Para o ensaio de teor de betume é utilizado uma amostra de RAP, papel filtro e o extrator Soxhlet.

Inicialmente, separou-se uma amostra de RAP com 500g, neste momento, é feita a pesagem do filtro, do RAP, e do filtro + RAP em um papel filtro. Posicionou-se o material e fechou o filtro em formato de um cartucho cilíndrico, com cerca de 14cm, conforme a Figura 03, com o cuidado para que o cartucho tenha um tamanho de fácil introdução na câmara de extração do Soxhlet.

Figura 3 - RAP em formato de cartucho no papel filtro



Fonte: Autora (2025)

Com o material preparado, ele é introduzido com cuidado no tubo do extrator Soxhlet e o aparelho é montado conforme a Figura 4, sendo adicionado cerca de 666 ml de solvente na parte inferior do extrator.

Figura 4 - Aparelho de Soxhlet montado



Fonte: Autora (2025)

O conjunto é aquecido, desta forma, havendo a circulação de água e ebulição do solvente. O processo é dado em ciclos, e somente é finalizado quando a água sai completamente limpa do aparelho.

Finalizados todos os ciclos, com a água saindo completamente limpa, a amostra é levada até a estufa. Com o peso da amostra estabilizado, ela é retirada da estufa e ocorre a pesagem da amostra.

A porcentagem de betume presente na mistura é dada pela equação 01.

$$\% \text{ betume} = \frac{(B-A)-(C-A)}{(B-A)} \times 100 \quad (01)$$

A = massa do filtro

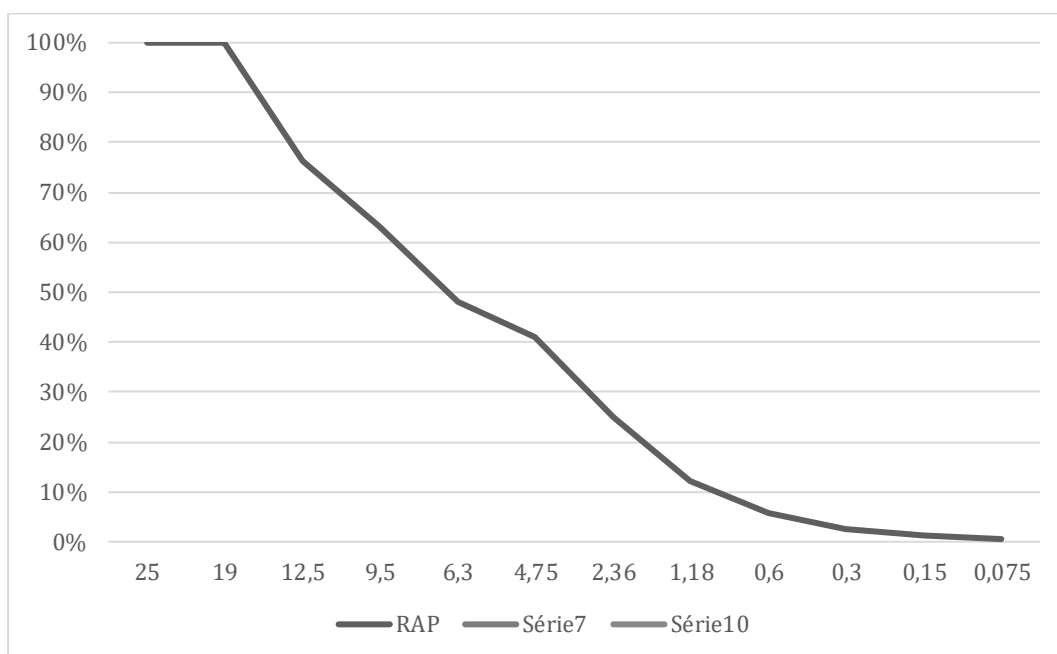
B = massa do filtro + amostra

C = massa do filtro + agregado após a extração

O teor de ligante extraído do RAP analisado neste estudo foi de 6,47%,.

A metodologia utilizada para a análise granulométrica do RAP foi baseada na norma DNER-ME 83/98, mesmo procedimento aplicado aos agregados naturais. O material fresado, após ser obtido em sua forma seca, foi submetido ao peneiramento inicial na peneira de 19 mm, sendo descartado o material retido, por apresentar granulometria superior à faixa aplicada no estudo. Em seguida, o material passante foi peneirado sucessivamente nas peneiras com aberturas de 19 mm até 0,075 mm, separando-se e pesando-se a fração retida em cada peneira.

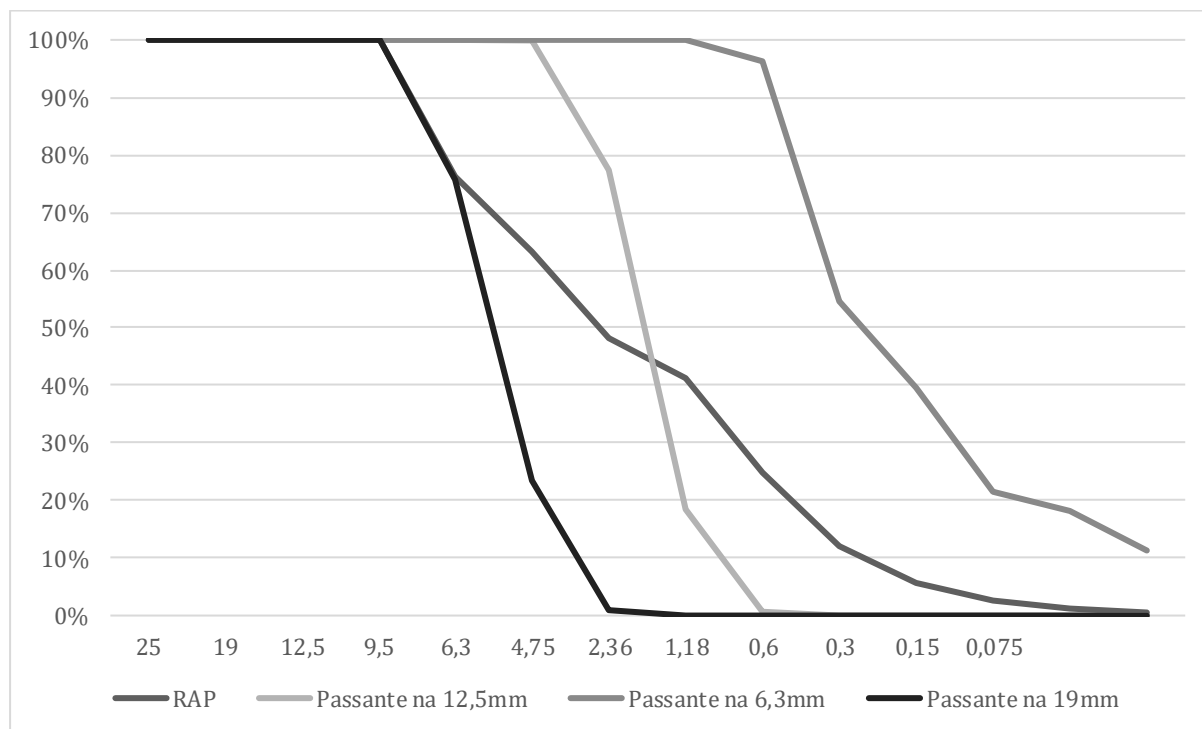
Figura 5 - Curva granulométrica do RAP (%/mm)



Fonte: Autora (2025)

Com os dados obtidos, e elaborada a curva granulométrica do material fresado, é possível analisar e comparar com a curva granulométrica obtida da granulometria dos agregados, conforme o Figura 6.

Figura 6 - Curva granulométrica dos agregados naturais e RAP (%/mm)



Fonte: Autora (2025)

Fazendo uma análise comparativa entre as curvas apresentadas, observa-se que o RAP apresenta uma curva contínua e bem graduada, indicando a presença de frações de finos e partículas graúdas, o que é característico de materiais provenientes de misturas asfálticas compactadas.

O maior teor de material fino do RAP, decorrente do desgaste e da fragmentação durante o processo de fresagem, pode contribuir para melhor empacotamento e coesão na mistura reciclada, embora demande atenção para evitar excesso de finos que possam comprometer a trabalhabilidade e a drenagem do revestimento Frota, (2023).

3.2. MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida a partir da elaboração de diferentes composições de misturas asfálticas, variando a proporção de material fresado. Foram adotados dois níveis de substituição dos agregados virgens por RAP, sendo: 0% (mistura referência), 10% e 20%.

Para a avaliação dos ensaios realizados foram moldados 15 CP's para o traço referência, para avaliação do teor ótimo de CAP, variando de 0,5% a quantidade de CAP adicionado, passando por 5%, 5,5%, 6%, 6,5% e 7% de CAP. Após a definição do teor ótimo de CAP, foram moldados mais 6 CP's variando a quantidade de RAP presente na mistura, em 10 e 20%.

Tabela 8 - Quantidade de CPs moldados

CP's	% RAP	% CAP
10	0	5
		5,5
		6
		6,5
		7
5	10	Teor ideal
6	20	Teor ideal
27	Quantidade total de CP's	

Fonte: Autora (2025)

A seguir serão apresentadas as curvas granulométricas montadas para cada um dos traços.

3.1.1. Curva Granulométrica das composições

A definição do traço e proporção de materiais a serem utilizados são definidos após a finalização da caracterização do material fresado e agregados naturais, para que, dessa forma, os materiais da mistura possam ser dimensionados para atender a curva granulométrica requerida.

Na Tabela 9, o traço foi dimensionado para que atenda a Faixa C do DNIT 031/2024, a faixa escolhida foi baseada nas granulometrias obtidas.

A faixa adotada para ser seguida foi determinada pelo método das tentativas, ou seja, com o material caracterizado, foi sendo testado em cada faixa da norma para ver em qual o material se enquadrava.

Tabela 9 - Proporções de material utilizado na moldagem dos CPs

RAP (%)	Passante na 19mm (%)	Passante na 12,5mm (%)	Passante na 6,3mm (%)	Total (%)
0	22	28	50	100
10	24	23	43	100
20	19,5	19,5	41	100

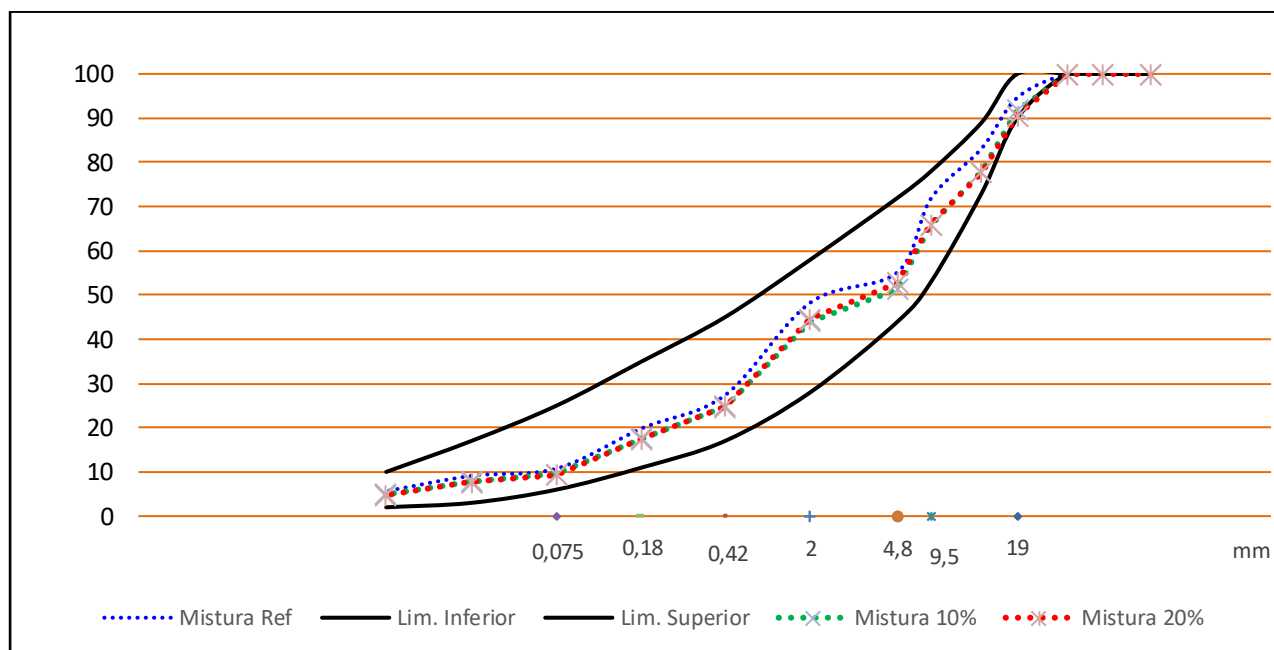
Fonte: Autora (2025)

Observa-se que, com o aumento do percentual de RAP na mistura, houve uma redução proporcional nas frações de agregados naturais passantes nas peneiras de 19 mm, 12,5 mm e 6,3 mm, uma vez que essas porcentagens foram substituídas pelo material fresado incorporado. Essa redução não indica alteração na granulometria global da mistura, mas sim o ajuste necessário na dosagem para manter o volume total de agregados, respeitando as proporções previstas no traço original.

Após a definição das porcentagens de cada material empregado em cada mistura, foram elaborados os gráficos das curvas granulométricas correspondentes, considerando os limites estabelecidos pela norma DNIT 031/2024, para a faixa granulométrica C – 12,5 mm.

No gráfico, foram apresentadas a curva granulométrica das três diferentes misturas e o limite da faixa C-12,5.

Figura 04: Curva granulométrica das misturas



Fonte: Autora (2025)

A curva da mistura com 20% de substituição de RAP apresenta comportamento similar a curva com 10% de substituição, ainda dentro da faixa estabelecida na norma.

Dessa forma, observa-se que todas as misturas se enquadram na faixa granulométrica estabelecida. Com as curvas e as proporções de cada material definidas, torna-se possível determinar a quantidade de material por peneira a ser utilizada na moldagem de cada corpo de prova (CP). As quantidades variam conforme o ensaio, considerando a substituição parcial dos agregados naturais por RAP nas misturas com teores de 10% e 20%.

3.2.1. Produção dos corpos de prova

Após a definição das quantidades e traços a serem utilizados no estudo, com e sem RAP e com diferenças no teor de ligante incorporado, inicia-se a produção dos CP's para ensaio. A norma DNIT 178/2018 - PRO estabelece alguns parâmetros para a moldagem e preparação dos corpos de prova.

Para a amostra, a norma estabelece em primeiro momento a preparação dos agregados naturais, a secagem dos mesmos em estufa a temperatura de 105,0°C a 110,0°C, para eliminação da umidade. Após esfriar, o material foi separado de acordo com sua faixa granulométrica, por peneira.

Após a separação, o material foi fracionado conforme as proporções previamente definidas para cada CP. Em seguida, o material fracionado foi aquecido à temperatura de 185 °C, ou seja, cerca de 10 °C acima da temperatura do ligante asfáltico, conforme especifica a norma, 175 °C. Quando os agregados atingiram a temperatura estabelecida, o ligante asfáltico foi adicionado na proporção determinada, a mistura é envolvida até que todos os agregados naturais estejam completamente envolvidos pelo ligante asfáltico, conforme a Figura 7.

Figura 7 - Mistura asfáltica pronta para ser compactada



Fonte: Autora (2025)

O processo de mistura de cada amostra é feito individualmente, para que assim, haja um controle das quantidades de materiais presentes em cada CP.

A introdução do RAP na mistura ocorre após a homogeneização do ligante asfáltico com os agregados. Somente após essa etapa, o RAP é incorporado e rapidamente misturado, visando a completa homogeneização de todos os materiais.

Com todo o material homogeneizado, à temperatura de 175°C, o material é transferido para o molde de compactação, o processo de compactação foi realizado

com o compactador automático, com uma sequência de 75 golpes por face do CP. Finalizada a compactação, o molde é retirado do compactador, permanecendo um período de 24h em superfície plana para esfriamento. Quando o CP atingir a temperatura ambiente, ele é desmoldado, Figura 8, realizando o registro de altura, diâmetro e pesos do CP.

Figura 8 - CP desmoldado



Fonte: Autora (2025)

Após a desmoldagem dos CP's, eles são submetidos aos ensaios mecânicos para determinações como estabilidade, fluência e resistência a tração.

3.2.2. Ensaio

Abaixo encontram-se os ensaios realizados nas misturas asfálticas do estudo com diferentes proporções de teor de ligante e material fresado, a fim de obter-se valores para comparação. Os ensaios realizados buscam a análise a respeito da compactação, fluência, resistência e estabilidade, e análise do comportamento dessas diferentes amostras, visando o entendimento da influência das proporções do material fresado incorporado.

A Tabela 10 apresenta a metodologia aplicada para cada um dos ensaios realizados no estudo.

Tabela 10 - Metodologias para ensaios

Ensaio	Metodologia
Densidade Máxima Medida (g/cm ³)	DNIT 427/2020 – ME
Densidade Aparente (g/cm ³)	DNIT 428/2022 – ME
RTCD (Kg/cm ³)	DNIT 136/2018 – ME
Estabilidade (Kgf)	DNIT 447/2024 – ME
Fluência (mm)	DNIT 447/2024 – ME

Fonte: Autora (2025)

3.2.2.1. Massa específica e densidade relativa máxima de misturas asfálticas

A massa específica aparente e a densidade relativa máxima teórica são parâmetros essenciais para a caracterização volumétrica de corpos de prova de misturas asfálticas, permitindo avaliar a qualidade da compactação e o comportamento da mistura em serviço.

A massa específica aparente (G_{mb}) é determinada conforme descrito na norma DNIT 164/2018 – ME. Essa propriedade representa a razão entre a massa seca do corpo de prova e o seu volume total, incluindo o volume dos vazios de ar presentes na amostra. Valores adequados de massa específica indicam uma compactação eficiente e boa estrutura interna da mistura, fatores diretamente relacionados à durabilidade e resistência ao dano por umidade e deformações permanentes Pinto, et al. (2010).

Já a densidade relativa máxima teórica (G_{mm}) representa a densidade que a mistura apresentaria caso todos os vazios de ar fossem eliminados. Esse ensaio é fundamental para o cálculo de parâmetros volumétricos, como a percentagem de vazios de ar (V_a), os vazios no agregado mineral (VMA).

A relação entre G_{mb} e G_{mm} permite avaliar a eficiência da compactação dos corpos de prova e estimar a densidade de campo desejável para a execução do revestimento. Segundo Bernucci et al. (2010), valores de vazios de ar entre 3% e 5%

são geralmente considerados adequados para misturas densas, garantindo um equilíbrio entre impermeabilidade e resistência mecânica.

Esses parâmetros são ainda mais relevantes em misturas com adição de RAP, nas quais o material fresado tende a aumentar a densidade máxima teórica em função de sua granulometria mais fina e do teor de ligante envelhecido. Assim, a correta determinação da massa específica e da densidade relativa máxima é essencial para ajustar o processo de compactação e assegurar o desempenho adequado da mistura reciclada.

Para a determinação da densidade relativa máxima medida, utiliza-se a fórmula 02.

$$Gmm = \frac{A}{A + B - C} \quad (02)$$

Onde,

Gmm - densidade relativa máxima medida da mistura (adimensional)

A - massa da amostra seca ao ar (g)

B - massa do recipiente com volume completo de água (g)

C - massa do recipiente contendo a amostra submersa (g)

Para a determinação da massa específica máxima medida da mistura utiliza-se a fórmula 03.

$$MEmm = 0,9971 \times Gmm \quad (03)$$

Onde,

MEmm - massa específica medida da mistura (g/cm³);

Gmm - densidade relativa máxima medida da mistura (adimensional).

3.2.4.4. Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) é utilizado para avaliar a coesão interna e a resistência à tração indireta de misturas asfálticas, sendo um importante indicador do comportamento mecânico e da durabilidade do

pavimento. O ensaio consiste em aplicar uma carga compressiva ao longo do diâmetro do corpo de prova cilíndrico até a ruptura da amostra. Essa solicitação gera tensões de tração na direção perpendicular ao carregamento, permitindo estimar a resistência à tração do material de forma indireta.

A norma técnica DNIT 136/2018 - ME prescreve o modo pelo qual é determinado a resistência à tração indireta de um corpo de prova cilíndrico de mistura asfáltica, por meio do ensaio de compressão diametral com carregamento estático crescente até a ruptura.

O corpo de prova deve ser posicionado no dispositivo centralizador, com sua superfície cilíndrica entre os dois frisos metálicos. Com a prensa de Marshall, é aplicada a carga vertical de compressão, progressivamente, até que se dê a ruptura completa, por separação das duas partes do corpo de prova, segundo o plano diametral vertical.

Sendo registrado os deslocamentos verticais e a carga de ruptura. Com o valor da carga de ruptura obtido, deve-se calcular a resistência à tração indireta do corpo de prova rompido por compressão diametral, utilizando a equação 4.

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi \times D \times H} \quad (04)$$

Onde,

σ_R - resistência à tração, 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.

O resultado obtido reflete a capacidade da mistura resistir às tensões de tração geradas pelo tráfego e pelas variações térmicas. Valores mais elevados de resistência indicam uma mistura com maior coesão e melhor desempenho estrutural, enquanto valores reduzidos podem indicar excesso de ligante, deficiência de compactação ou presença de materiais envelhecidos.

Segundo Bernucci et al. (2010), o ensaio de tração por compressão diametral é fundamental para estimar o potencial de fissuração e fadiga das misturas asfálticas,

auxiliando na avaliação comparativa de diferentes teores de ligante ou percentuais de materiais reciclados

3.2.4.2. Estabilidade e Fluência

O ensaio Marshall tem como objetivo determinar a estabilidade e a fluência de misturas asfálticas, fornecendo parâmetros essenciais para avaliar a resistência e a deformabilidade do material sob ação de cargas de tráfego.

O ensaio consiste em submeter um corpo de prova cilíndrico compactado a uma carga de compressão diametral a uma taxa constante de deformação, em temperatura de ensaio controlada de 60 °C. Durante o carregamento, registra-se a força máxima suportada pela amostra e a deformação correspondente.

A partir deste ensaio obtemos, o parâmetro de Estabilidade (kN) que representa a carga máxima que o corpo de prova suporta antes da ruptura, sendo um indicador da resistência à deformação plástica e à ação do tráfego e a Fluência (mm) que corresponde à deformação total ocorrida até o ponto de ruptura, refletindo a capacidade de deformação e a flexibilidade da mistura.

Segundo Bernucci et al. (2010), a estabilidade elevada indica boa coesão e resistência estrutural, enquanto valores de fluência dentro de limites moderados sugerem misturas equilibradas, capazes de resistir à deformação sem se tornar excessivamente rígidas. A DNIT 031/2024 – ES estabelece faixas de aceitação para esses parâmetros, recomendando valores de estabilidade mínima de 5,3 kN e fluência entre 2 mm e 4 mm, conforme a faixa granulométrica e o tipo de mistura.

Com base na metodologia dos ensaios apresentados, torna-se possível avaliar, de forma controlada e sistemática, os efeitos da variação da proporção de material fresado (RAP) nas características da mistura asfáltica. Cada etapa foi estruturada de maneira a garantir a representatividade dos resultados, desde a seleção e preparação dos materiais até os ensaios laboratoriais, respeitando normas técnicas vigentes.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

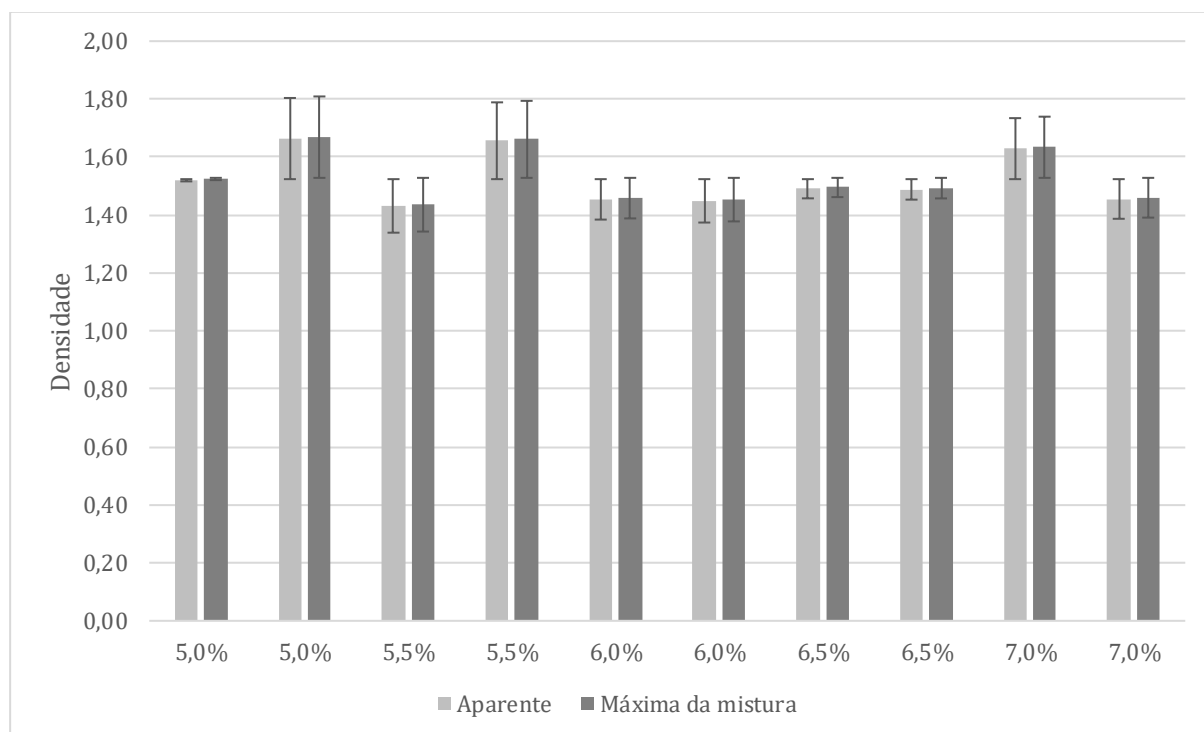
Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos neste estudo, a respeito da incorporação de diferentes proporções de RAP (0, 10, e 20%) na mistura asfáltica, sobre suas características de densidades, estabilidade, fluência e resistência à tração.

4.1. Teor ótimo de ligante

No primeiro momento, foram registradas as dimensões dos CP's desmoldados das misturas referencias, como espessura, altura e pesos, no Apêndice A.

Tirados os dados iniciais é possível a determinação das densidades aparentes e máximas da mistura, apresentados no Apêndice B, como na figura 9.

Figura 9 - Densidades da mistura referência



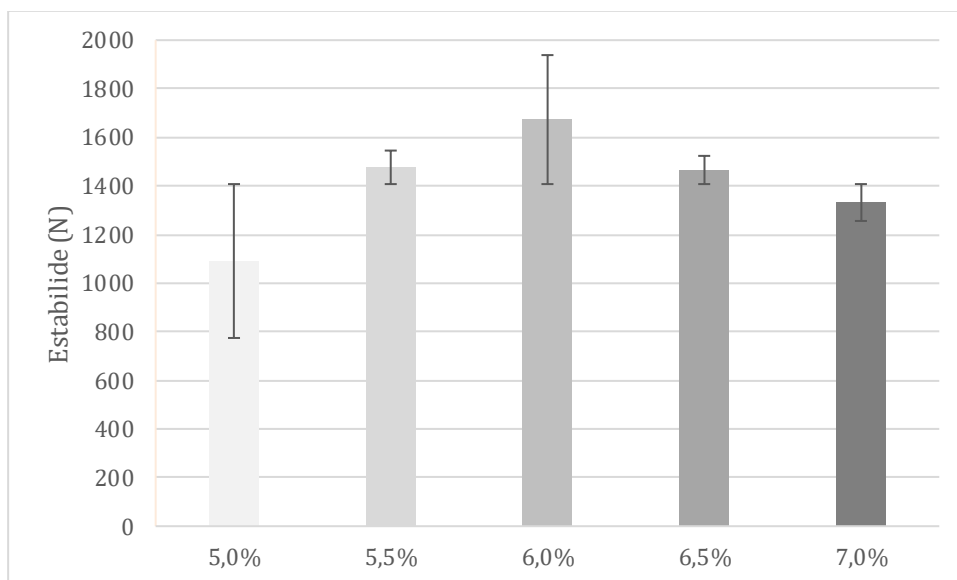
Fonte: Autora (2025)

Observando os valores obtidos para a densidade aparente e a densidade máxima teórica das misturas, nota-se que a diferença entre essas grandezas se manteve bastante reduzida, variando entre aproximadamente 0,0042 e 0,0048 g/cm³. As amostras que apresentaram menores diferenças, situadas entre 5,5 e 6% de teor

de CAP, indicam uma melhor concentração de ligante asfáltico, visto que o volume de vazios de ar é menor, refletindo uma mistura mais densa, coesa e bem compactada. Por outro lado, as amostras com diferenças ligeiramente superiores, em torno de $0,0048 \text{ g/cm}^3$, sugerem menor teor de ligante ou compactação menos eficiente, o que pode resultar em maior percentual de vazios. De modo geral, todas as misturas avaliadas apresentaram diferenças pequenas entre as densidades aparente e máxima, o que sugere que o teor de ligante adotado foi adequado para promover uma estrutura interna equilibrada e garantir boas condições de durabilidade e resistência mecânica do material.

Para o ensaio de estabilidade, 5 dos 10 CPs moldados foram rompidos obtendo os valores apresentados abaixo.

Figura 10 - Estabilidade da mistura referência



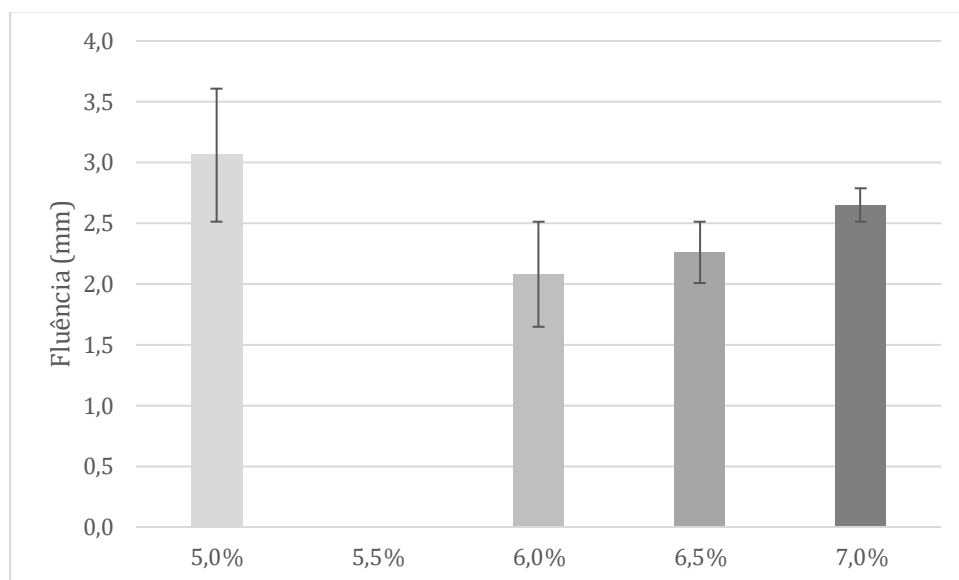
Fonte: Autora (2025)

Observa-se uma tendência típica de comportamento das misturas asfálticas em função do teor de ligante. A estabilidade aumenta progressivamente do teor de 5,0% (1091,13 N) até atingir seu valor máximo em 6,0% (1673,13 N), indicando que o aumento inicial do CAP promoveu melhor recobrimento dos agregados e maior coesão interna. A partir desse ponto (6,5% e 7,0%), há uma redução gradual da estabilidade (1465,79 N e 1331,87 N, respectivamente), comportamento associado ao excesso de ligante, que torna a mistura mais plástica e suscetível à deformação sob carga. No entanto, considera-se que o teor ótimo de ligante para o ensaio de

estabilidade é de 6%, uma vez que é nesse ponto que a mistura apresenta seu pico de estabilidade.

Para o ensaio de fluência, foram rompidos os restantes 5 corpos de prova, porém, apenas 4 apresentaram resultados válidos, uma vez que um deles foi invalidado devido a erro de medição do equipamento, conforme abaixo.

Figura 11 - Fluência da mistura referência

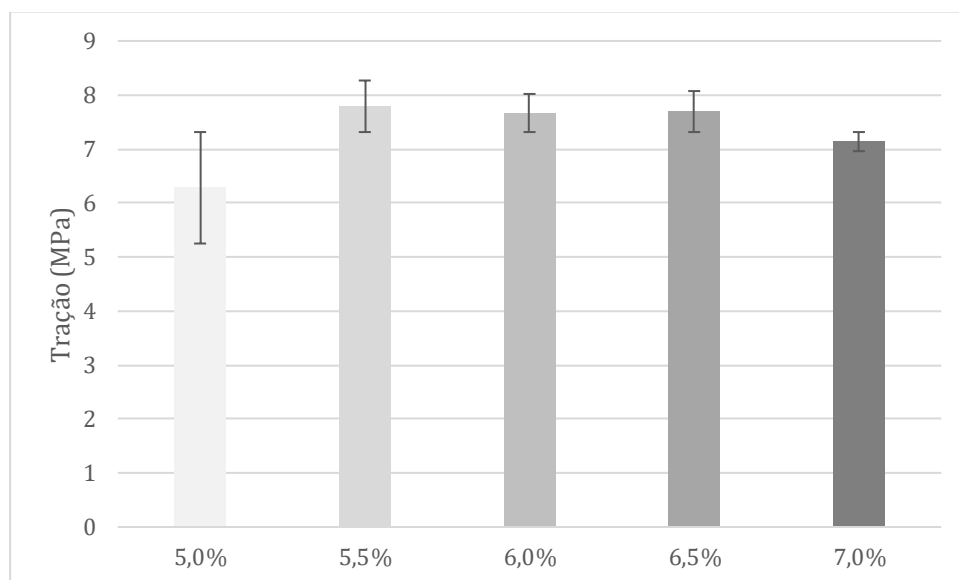


Fonte: Autora (2025)

Quanto à fluência, os valores também corroboram a tendência dos valores de estabilidade, o menor valor (2,08 mm) ocorre no teor de 6,0%, correspondente à melhor combinação entre resistência e flexibilidade. Já nos teores mais baixos (5,0%) e mais altos (7,0%), a fluência aumenta (3,06 mm e 2,65 mm), indicando respectivamente mistura mais seca e frágil e mistura excessivamente plástica. O valor nulo em 5,5% pode estar relacionado a erro experimental ou comportamento muito rígido da amostra, o que limita a deformação registrada. Dessa forma, quanto a fluência, o teor de 6,0% de CAP também se mostra o mais adequado, pois proporciona o melhor equilíbrio entre rigidez e deformabilidade, refletindo a condição ideal de desempenho mecânico para a mistura. Esse comportamento, confirma o padrão descrito por Bernucci et al. (2010) e DNIT ME 133/2018, segundo os quais o teor ótimo de ligante é aquele que maximiza a estabilidade e mantém a fluência dentro da faixa recomendada (2 a 4 mm).

Após a determinação dos resultados de estabilidade e fluência, procedeu-se à realização do ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD). Esse ensaio complementa a caracterização mecânica das misturas, permitindo avaliar a resistência à tração indireta, parâmetro essencial para verificar a aderência entre agregados e ligante asfáltico e a durabilidade estrutural da mistura.

Figura 12 - Resistência a tração por compressão diametral da mistura referência



Fonte: Autora (2025)

Observa-se que a resistência à tração apresenta uma tendência ascendente até um ponto ótimo, seguida de uma leve redução nos teores mais elevados de ligante, comportamento típico das misturas asfálticas. O valor mínimo foi registrado para o teor de 5,0% de CAP (6,281 MPa), o que indica baixa coesão entre os agregados e deficiência de ligante para promover adequada adesividade.

Com o aumento gradual do teor de CAP, há um crescimento na resistência à tração, atingindo valores máximos de 7,790 MPa (5,5%), 7,666 MPa (6,0%) e 7,693 MPa (6,5%). Nessa faixa, o ligante asfáltico proporciona melhor envolvimento dos grãos e distribuição uniforme dos esforços, resultando em maior resistência às tensões de tração indireta.

A partir do teor de 7,0% (7,136 MPa), nota-se uma redução da resistência, associada ao excesso de ligante, que tende a diminuir a rigidez da mistura, tornando-a mais suscetível à deformação plástica e à perda de coesão sob carga. Os resultados indicam que a melhor resposta mecânica ocorre entre 5,5% e 6,5% de CAP, com pico

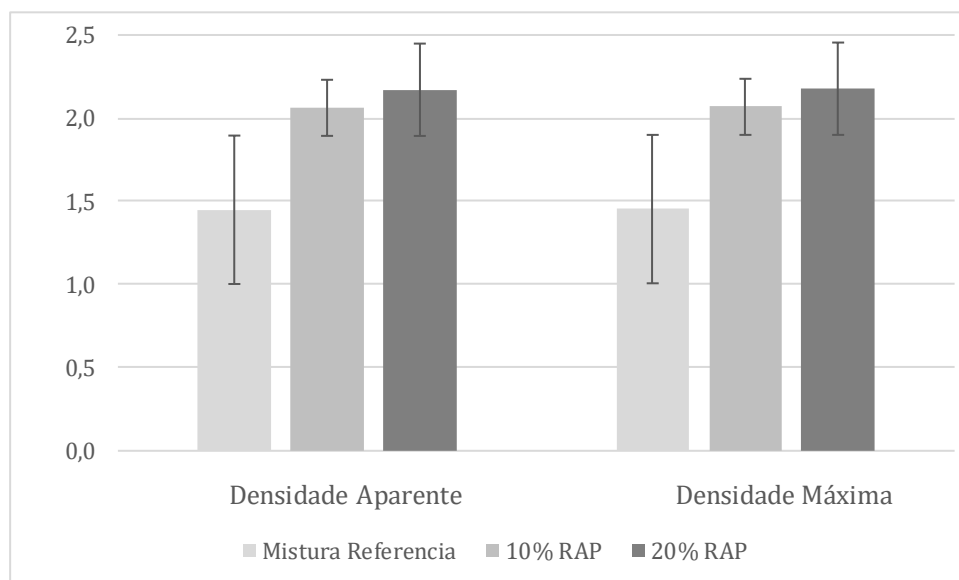
de resistência em 5,5%. Esse comportamento está de acordo com a literatura técnica, que aponta que o teor ótimo de ligante é aquele que maximiza a resistência à tração sem comprometer a durabilidade e estabilidade volumétrica (BERNUCCI et al., 2010; DNIT ME 136/2018). Em suma, o teor de 5,5% de CAP, no ensaio de RTCD, se mostra o mais adequado em termos de desempenho à tração, representando o ponto de melhor equilíbrio entre coesão, rigidez e flexibilidade da mistura.

Considerando o conjunto dos resultados, como máxima estabilidade, fluência adequada, alta resistência à tração e parâmetros volumétricos dentro da faixa ideal, o teor de 6% de CAP representa o ponto de melhor desempenho global da mistura. Esse valor maximiza a coesão e a resistência mecânica, sem comprometer a flexibilidade nem a durabilidade. Desta forma, os CP's com substituição de 10 e 20% de RAP, foram moldados apenas com o teor ótimo encontrado.

4.2. Densidades das amostras ensaiadas

A partir das informações iniciais de pesos foram encontrados os valores abaixo.

Figura 13 - Resultados obtidos de densidade com diferentes adições de RAP



Fonte: Autora (2025)

Ao comparar os resultados, nota-se que as densidades aparentes e máximas da mistura com 10% de RAP são superiores às observadas na mistura de referência, que apresentaram valores médios entre 1,45 e 1,66 g/cm³. Essa diferença significativa indica que a adição de RAP conferiu maior compactação à mistura, possivelmente em

função da maior densidade dos agregados presentes no material fresado e da presença de ligante envelhecido, que tende a preencher parcialmente os vazios entre partículas.

As misturas de referência, produzidas exclusivamente com agregados virgens, apresentaram as menores densidades, indicando uma estrutura interna mais aberta e maior volume de vazios. Com a introdução de 10% e 20% de RAP, nota-se um aumento expressivo e progressivo das densidades, resultado da presença de agregados mais rígidos e de maior massa específica, além do ligante envelhecido que contribui para um empacotamento mais eficiente da mistura. Esse incremento de densidade evidencia que as misturas com RAP tendem a se tornar mais fechadas e compactas, reduzindo os vazios e aumentando a rigidez estrutural. O comportamento observado aponta que a adição de RAP modifica significativamente a matriz granular, tornando-a mais densa e potencialmente mais resistente, embora também mais suscetível ao aumento de rigidez conforme o teor de material fresado cresce.

Observando os valores obtidos para a densidade aparente e a densidade máxima teórica das misturas, nota-se que a diferença entre essas grandezas se manteve bastante reduzida, variando entre aproximadamente 0,0042 e 0,0048 g/cm³. As amostras que apresentaram menores diferenças, indicam uma melhor concentração de ligante asfáltico, visto que o volume de vazios de ar é menor, refletindo uma mistura mais densa, coesa e bem compactada. Por outro lado, se as amostras apresentassem diferenças superiores, sugere menor teor de ligante ou compactação menos eficiente, o que pode resultar em maior percentual de vazios. De modo geral, todas as misturas avaliadas apresentaram diferenças pequenas entre as densidades aparente e máxima, o que sugere que o teor de ligante adotado foi adequado para promover uma estrutura interna equilibrada e garantir boas condições de durabilidade e resistência mecânica do material.

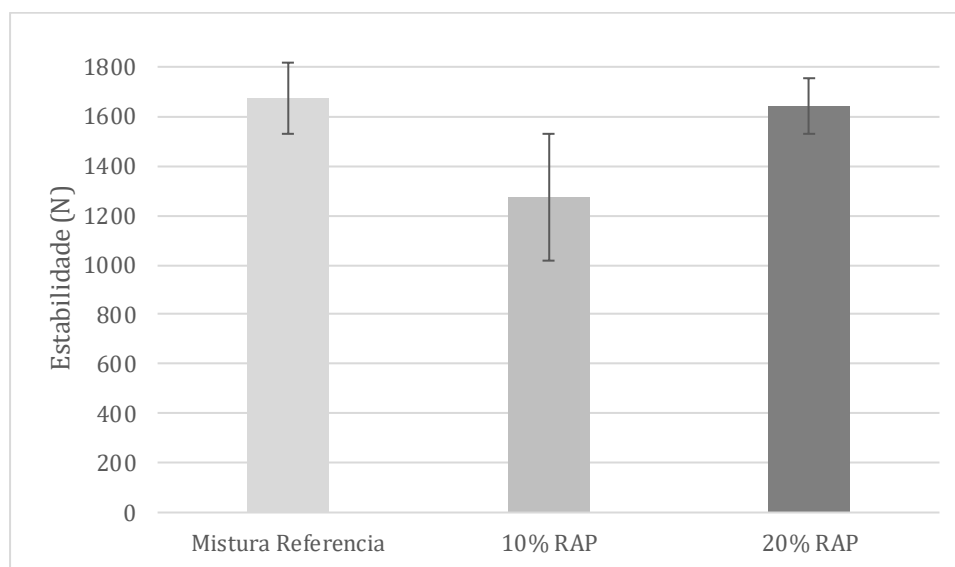
A análise das densidades evidencia diferenças marcantes entre as misturas de referência e aquelas contendo RAP, bem como entre os próprios teores de 10% e 20%. As misturas de referência, compostas apenas por agregados virgens, apresentam as menores densidades, refletindo uma estrutura mais aberta e maior presença de vazios. Quando se adiciona 10% de RAP, observa-se um aumento significativo das densidades aparente e máxima, indicando maior compactação e melhor empacotamento dos grãos devido à presença de agregados mais densos e

ao ligante envelhecido. Esse efeito torna-se ainda mais evidente com 20% de RAP, que apresenta as maiores densidades entre todas as misturas. O salto entre 10% e 20% confirmam que o acréscimo de RAP intensifica a redução de vazios e a rigidez da mistura, ainda que o ganho de densidade ocorra de forma mais moderada nesse intervalo. Já quando se compara a mistura de referência com a de 20% de RAP, o contraste é ainda mais expressivo: as densidades praticamente duplicam, evidenciando o impacto substancial do material fresado na constituição da mistura e reforçando a tendência de formação de uma matriz granular mais densa, compacta e estruturalmente rígida.

4.1. Estabilidade das amostras ensaiadas

A partir dos ensaios de estabilidade foram encontrados os valores abaixo.

Figura 14 - Resultados obtidos de estabilidade com diferentes adições de RAP



Fonte: Autora (2025)

Os resultados mostram estabilidades médias entre 1238 N, representa uma leve redução na resistência à deformação plástica quando comparado à mistura de referência. Essa diferença é esperada, pois a maior densidade resultante da incorporação de RAP tende a reduzir a aderência efetiva entre o CAP e o material reciclado, diminuindo a coesão interna da mistura, resultado que reflete o mesmo encontrado por Centovante (2018) em seus estudos. Ao elevarmos o teor para 20%, a estabilidade tende a ser maior que a observada nos 10%, reforçando a rigidez estrutural imposta pelo maior conteúdo de material fresado.

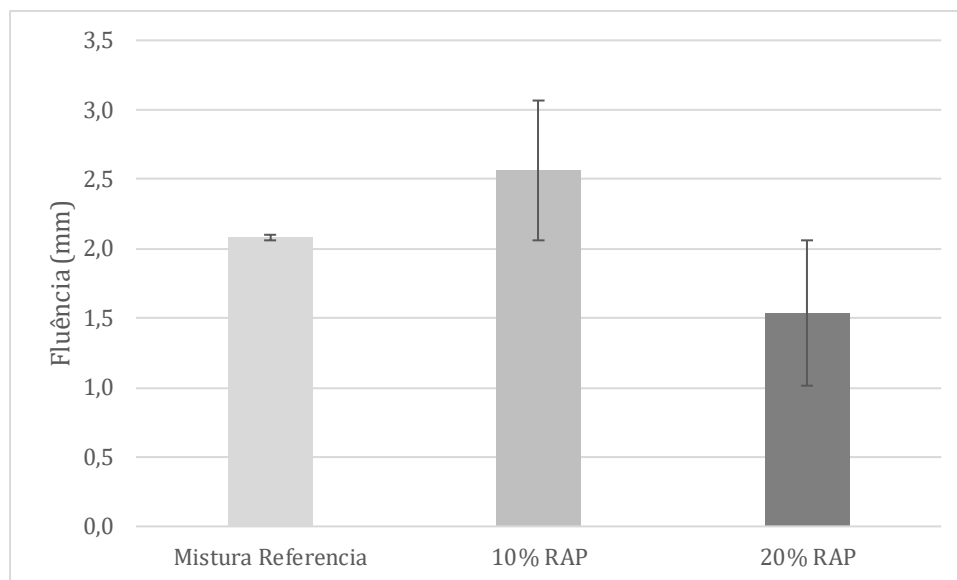
A análise dos valores de estabilidade revela um comportamento bastante característico de misturas asfálticas com diferentes teores de RAP. Observa-se que a mistura de referência apresenta estabilidade de 1673,13 N. Quando se adiciona 10% de RAP, ocorre uma redução da estabilidade para 1273,33, indicando que essa pequena quantidade de RAP não foi suficiente para elevar a rigidez estrutural da mistura; pelo contrário, ela tende a desestabilizar o equilíbrio inicial, resultando em menor capacidade de resistência. Esse comportamento também é reportado por Copeland (2011), que afirma que teores baixos de RAP têm efeito limitado ou até negativo na resistência mecânica, pois a quantidade reduzida de ligante envelhecido não altera significativamente a coesão global da matriz.

Por outro lado, ao elevar o teor para 20% de RAP, verifica-se uma recuperação significativa da estabilidade, atingindo 1641,67 N, valor muito próximo ao da mistura de referência. Esse comportamento é coerente com o que relatam West, et al. (2013), os quais demonstram que teores moderados a elevados de RAP aumentam a rigidez e a estabilidade, em razão da maior incorporação do ligante oxidado presente no material fresado, que confere maior coesão interna. Além disso, segundo Huang (2012), misturas com maior porcentagem de RAP tendem a apresentar menor fluência devido ao ligante envelhecido, que reduz a capacidade de fluxo e aumenta a resistência à deformação.

4.1. Fluência das amostras ensaiadas

A partir dos ensaios de fluência foram encontrados os resultados apresentados abaixo.

Figura 15 - Resultados obtidos de fluência com diferentes adições de RAP



Fonte: Autora (2025)

Os resultados da mistura com 10% de RAP mostram um pequeno aumento na deformabilidade quando comparado à mistura de referência. Quanto a amostra com 20% de RAP, o comportamento segue a tendência oposta, nas misturas com RAP, observa-se redução da deformabilidade, com valores mais baixos de fluência quando comparados tanto ao traço de referência quanto ao traço com 10% de RAP.

Assim, o comparativo evidencia que, enquanto o aumento de RAP eleva significativamente a capacidade resistente (estabilidade), ele também reduz a capacidade de deformação (fluência), sendo essa diferença mais acentuada quando se compara a mistura de referência com a de 20% de RAP, que apresenta o conjunto mais rígido entre todos os níveis analisados.

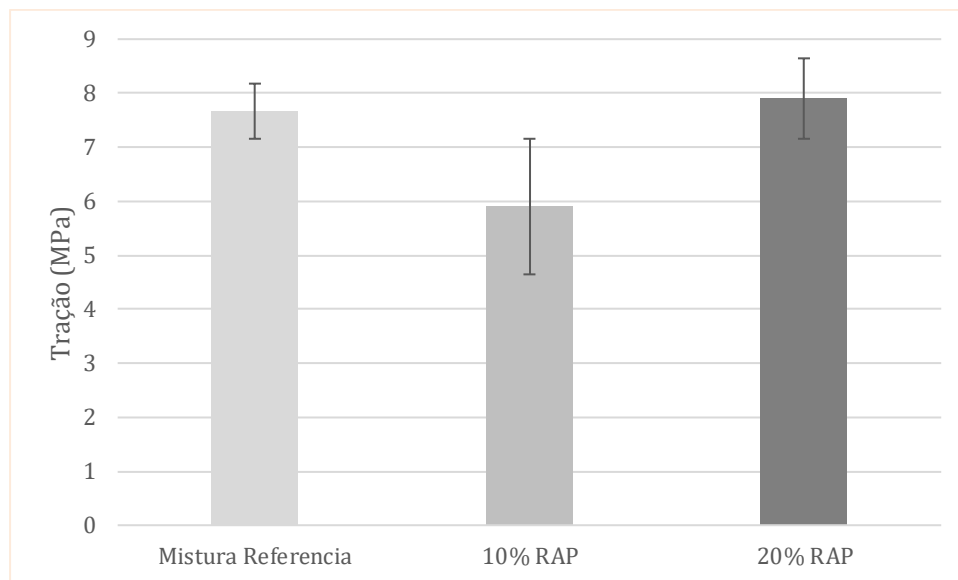
A análise dos valores de fluência revela um comportamento bastante característico de misturas asfálticas com diferentes teores de RAP. Observa-se que a mistura de referência apresenta fluência de 2,080 mm. Quando se adiciona 10% de RAP, ocorre um aumento da fluência para 2,563 mm, indicando que essa pequena quantidade de RAP resulta em maior deformação plástica. Ao elevar o teor para 20%

de RAP, a fluência reduz para 1,570 mm, evidenciando menor susceptibilidade à deformação, em virtude do ligante envelhecido.

4.1. Resistência a tração por compressão diametral das amostras ensaiadas

A partir dos ensaios de resistência a tração por compressão diametral foram encontrados os resultados apresentados abaixo.

Figura 16 - Resultados obtidos de tração com diferentes adições de RAP



Fonte: Autora (2025)

A mistura contendo 10% de RAP apresentou uma redução em relação à mistura de referência. Tal decréscimo pode ser atribuído, principalmente, à presença do ligante envelhecido contido no RAP. Além disso, a interação entre o ligante envelhecido do RAP e o ligante virgem novo pode não ser totalmente eficiente, sobretudo quando não são empregados agentes rejuvenescedores. Essa limitação na homogeneização pode gerar zonas com diferentes rigidezes dentro da mistura, contribuindo para uma resposta mecânica menos uniforme e, conseqüentemente, menor resistência à tração.

A análise dos valores de resistência à tração por compressão diametral revela comportamentos distintos conforme o teor de RAP incorporado à mistura. A mistura de referência, com teor de ligante de 6,0%, apresenta resistência de 7,666 MPa, valor

típico de uma mistura com ligante virgem, caracterizada por boa coesão. Quando se adiciona 10% de RAP, observa-se uma redução significativa da resistência, para 5,900 MPa, indicando que esse teor moderado de RAP não foi suficiente para promover ganho estrutural; pelo contrário, o ligante envelhecido presente no RAP, quando incorporado em pequena quantidade, tende a aumentar a rigidez sem beneficiar a coesão global, resultando em menor resistência à tração. Esse comportamento é descrito por Copeland (2011), que afirma que teores baixos de RAP frequentemente reduzem o desempenho mecânico por não incorporarem quantidade suficiente de ligante oxidado capaz de reforçar a matriz.

Por outro lado, ao elevar o teor para 20% de RAP, o comportamento se inverte, a resistência sobe para 7,900 MPa, ultrapassando inclusive o valor da mistura de referência. Esse aumento indica que a maior quantidade de ligante envelhecido presente no RAP passa a atuar de forma positiva na coesão da mistura, promovendo maior rigidez e resistência à tração. Estudos como os de West, et al. (2013) e Huang (2012) indicam que teores mais elevados de RAP tendem a aumentar a resistência à tração devido à maior participação do ligante oxidado, que confere maior adesão entre as partículas e resistência à separação sob carregamento diametral.

Assim, os resultados evidenciam um comportamento de, 10% de RAP reduz a resistência, enquanto 20% de RAP a eleva significativamente, demonstrando que neste caso apenas teores mais altos são capazes de proporcionar ganho estrutural na resistência à tração das misturas asfálticas.

De forma geral, os resultados indicam que a incorporação de 10% de RAP tende a aumentar a rigidez global da mistura, porém com perda de ductilidade e redução da resistência à tração indireta. Esse comportamento indica que pequenas porcentagens de RAP podem aumentar a rigidez sem melhorar a coesão, resultando em menor desempenho estrutural. A mistura com 20% de RAP apresenta resistência superando inclusive a mistura convencional. Esse aumento está associado à maior rigidez conferida pelo ligante envelhecido presente no RAP, contribuindo para uma mistura mais resistente à tração.

5. CONCLUSÃO

Este estudo investigou o impacto das adições das diferentes proporções de RAP na mistura asfáltica, avaliando as características padrão de um projeto de mistura asfáltica, sendo elas, a densidades, estabilidade, fluência, RTCD. Os resultados obtidos a partir dos ensaios de caracterização física e mecânica das misturas asfálticas, permitem avaliar o comportamento comparativo entre uma mistura de referência e outras contendo 10% e 20% de RAP. A partir dos resultados de densidade, estabilidade, fluência e resistência à tração indireta, é possível observar o impacto da introdução do RAP sobre as propriedades volumétricas e mecânicas da mistura.

Referente ao teor de ligante, com base nos ensaios realizados com os 10 CP's de referência e na análise conjunta dos resultados de estabilidade, fluência e resistência à tração, verifica-se que o teor ótimo de ligante para a mistura é de 6%, onde todos os ensaios apresentaram melhores resultados.

A análise das densidades mostra que as misturas com RAP apresentam valores significativamente superiores aos da mistura de referência, indicando maior compactação devido à presença de agregados mais densos e ligante envelhecido. As misturas de referência, exibem as menores densidades e maior volume de vazios. Com 10% e 20% de RAP, observa-se aumento progressivo da densidade aparente e máxima, refletindo uma matriz granular mais fechada e rígida.

Referente a estabilidade, os resultados indicam que a adição de 10% de RAP reduz a estabilidade da mistura em relação à referência, devido à menor coesão proporcionada pela quantidade limitada de ligante envelhecido. Já com 20% de RAP, a estabilidade aumenta novamente, pois a maior quantidade de material fresado incorpora mais ligante oxidado, elevando a rigidez e a resistência. Assim, teores moderados de RAP tendem a melhorar a estabilidade, enquanto teores baixos podem reduzir a resistência mecânica.

Já a fluência apresentou comportamentos distintos conforme o teor de RAP. Com 10% de RAP, há aumento da deformabilidade em relação à referência, indicando maior suscetibilidade à deformação plástica. Já com 20% de RAP, ocorre o efeito contrário: a fluência diminui significativamente, tornando a mistura mais rígida e menos deformável. Assim, enquanto baixos teores de RAP tendem a aumentar a

fluência, teores mais elevados reduzem a deformabilidade e tornam a mistura mais resistente.

A resistência à tração diminui quando 10% de RAP é incorporado, devido à presença de ligante envelhecido e à interação pouco eficiente entre o ligante virgem e o reciclado, o que reduz a coesão da mistura. Porém, ao aumentar o teor para 20% de RAP, a resistência cresce de forma expressiva e supera a da mistura de referência, indicando que apenas teores mais elevados proporcionam ganho estrutural. Esse comportamento ocorre porque quantidades maiores de RAP incorporam mais ligante oxidado, reforçando a rigidez e a coesão interna.

Assim, conclui-se que o RAP pode ser incorporado de forma eficiente às misturas asfálticas, desde que utilizado em proporções adequadas, permitindo ganhos mecânicos e volumétricos e contribuindo para práticas mais sustentáveis, embora seja recomendável a adoção de ajustes, como o uso de agentes rejuvenescedores, para otimizar ainda mais o desempenho e a homogeneização das misturas recicladas.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de colaborar para estudos futuros de forma a aprofundar o entendimento sobre a incorporação de RAP na mistura asfáltica, ficam as seguintes sugestões:

- a)** Realização de ensaios considerando o uso de agentes rejuvenescedores;
- b)** Análise de misturas com maiores percentuais de RAP (25% e 30%) para avaliação do comportamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DERSA DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A. ET-P0/022 – **Fresagem de Pavimento Asfáltico**. São Paulo, 1997.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. DER/PR ES-P 31/05. **Pavimentação: Fresagem a Frio**. Curitiba, 2005.

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

BELL, C. A. **A predição da deformação permanente em pavimentos flexíveis**. Tese submetida à University of Nottingham para obtenção do grau de Doutor em Filosofia. University of Nottingham, Reino Unido, 1978.

SANTOS, Mariana dos Reis; DEMUELENAERE, Rafael Gerard de Almeida. **Reciclagem de Pavimento Asfáltico a Quente *In Situ***. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 02, Vol. 01, pp. 5-16, Janeiro de 2018. ISSN: 2448-0959

SIQUEIRA, Mateus Valdevino de. **Avaliação de propriedades mecânicas de misturas asfálticas incorporadas com elevado teor de material fresado**. 2021. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) - Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/handle/123456789/279>

LUZZI, Felipe Cipriani. **Dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado**. *Revista de Engenharia Civil IMED*, v. 8, n. 1, p. 1-15, 2021. Disponível em: <https://seer.atitus.edu.br/index.php/revistaec/article/view/3327/2838>.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO RIO GRANDE DO SUL (DAER/RS). **SMA-PR-007: Diretrizes para Gestão de Material Fresado**. Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://daer.rs.gov.br/upload/arquivos/201910/14094033-sma-pr-007-diretrizes-para-gestao-de-material-fresado.pdf>.

CÂMARA, Raphael. **Resíduos da construção civil: caracterização, reaproveitamento e aplicações**. 2019. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/40379/2/Residuosconstru%C3%A7%C3%A3ocivil_Camara_2019.pdf.

DER-SP. **ET-DE-P00/038: Emprego de material fresado de revestimento asfáltico**. São Paulo: Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo, 2020. Disponível em: https://www.der.sp.gov.br/WebSite/Arquivos/normas/ET-DE-P00-038_B.pdf

SILVA, Gisely Leite de Oliveira. **Estudo da viabilidade do uso de material fresado na composição de pavimentos flexíveis**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso

(Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Caruaru, 2020. Disponível em: <https://attena.ufpe.br/bitstream/123456789/43912/1/SILVA%2C%20Gisely%20Leite%20de%20Oliveira%20.pdf>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT); UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UnB). **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: DNIT/UnB, 2006. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/42324601/Pavimentao_Asfiltica_Formao_Bsica_para_En20160207-27897-b09h31-libre.pdf.

ARLIMA FILHO, Francisco das Chagas. **Análise do uso de material fresado na pavimentação asfáltica**. 2016. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/68752/1/2016_tcc_arlimafilho.pdf. Acesso em: 10 maio 2025.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (Brasil). *DNIT 136/2018-ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio*. Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_136_2018_me-1.pdf. Acesso em: 10 maio 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (Brasil). *DNIT 416/2019-ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à trincagem por fadiga – Método de ensaio*. Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit416_2019_me.pdf. Acesso em: 10 maio 2025.

PESSONI, Hugo Rodrigues. **Utilização de material fresado na composição de camadas granulares de pavimentos flexíveis**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Aparecida de Goiânia, 2021. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/767/o/TCC2_-_Hugo_vers%C3%A3o_para_defesa-2020-2.pdf.

Melo Neto, O. D. M.; et al. **Viability of recycled asphalt mixtures with soybean oil sludge fatty acid**. Construction and Building Materials. 2022.

SUZUKI, K. Y. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. Brasil, 2019. Disponível em:

<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-21082019-141957/publico/KarinaYurikoSuzukiCorr19.pdf>

CHAMOUTON, Marco Salles. **Avaliação do desempenho em campo e em laboratório de misturas asfálticas com diferentes teores de RAP e agente de reciclagem.** 2024. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-20012025-083656/pt-br.php>

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). *Norma DNIT 136/2018–ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio.* Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2018. 9 p. Disponível em https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_136_2018_me-1.pdf

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. *Norma DNIT 427/2020–ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de ensaio.* Brasília: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2020. 17 p. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_427_2020_me-2.pdf

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. *Norma DNIT 428/2022–ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da massa específica dos agregados através do método de pirofórico – Método de ensaio.* Brasília: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2022. Disponível em https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_428_2022_me.pdf

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. *Norma DNIT 447/2024–ME: Misturas asfálticas – Ensaio de estabilidade e fluência Marshall – Método de ensaio (com incorporação da Errata 1).* Brasília: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, fev. 2024. 9 p. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_447_2024_me_estabilidade_marshall_com_incorporacao_errata_1.pdf

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. *Norma DNIT 427/2020–ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de ensaio.* Brasília: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), set. 2020. 9 p. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_427_2020_me-2.pdf.