



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**Faculdade de Engenharia Civil**



**ELIAS JOÃO BARBOSA JÚNIOR**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL POR RAP**

**UBERLÂNDIA**

**2025**

**ELIAS JOÃO BARBOSA JÚNIOR**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL POR RAP**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Engenharia Civil da Universidade  
Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos  
necessários para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Pires Leandro

**UBERLÂNDIA**

**2025**

## RESUMO

A matriz de transporte brasileira é predominantemente rodoviária, com mais de 60% das cargas e 90% dos passageiros transportados por rodovias. No entanto, mais de 50% dos 213.500 km de vias pavimentadas apresentam condições de superfície entre regular e péssima, demandando intervenções de reabilitação. Nesse contexto, uma alternativa frequentemente utilizada é a fresagem do revestimento asfáltico antigo, que resulta no *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), material composto por agregados e ligante asfáltico envelhecido. O reaproveitamento do RAP na produção de novas misturas asfálticas oferece benefícios econômicos e ambientais, pois reduz a extração de recursos naturais e minimiza a geração de resíduos inservíveis. Desse modo, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da substituição de parcela da fração graúda de uma mistura asfáltica por RAP para diferentes teores de ligante. Para essa avaliação foram realizados os ensaios HT-IDT (*High Temperature Indirect Tensile*) e IDEAL CT (*Indirect Tensile Asphalt Cracking Test*), visando analisar a propensão à deformação permanente e à suscetibilidade ao trincamento por fadiga, respectivamente. A principal conclusão do trabalho é que a incorporação de RAP é tecnicamente viável, com as misturas recicladas apresentando desempenho equivalente — e, em alguns casos, superior — ao das misturas convencionais, especialmente quanto ao potencial de trincamento. Observou-se, contudo, a necessidade de atenção à resistência à deformação permanente, devido ao possível aumento do teor de ligante efetivo.

**Palavras-Chave:** RAP. Misturas asfálticas. HT-IDT. IDEAL CT. Sustentabilidade.

## **ABSTRACT**

The Brazilian transportation matrix is predominantly road-based, with more than 60% of freight and 90% of passengers being transported via highways. However, more than 50% of the 213,500 km of paved roads are in fair to poor surface condition, requiring rehabilitation interventions. In this context, a commonly used alternative is the milling of the old asphalt pavement, which results in Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), a material composed of aggregates and aged asphalt binder. The reuse of RAP in the production of new asphalt mixtures offers economic and environmental benefits, by reducing the extraction of natural resources and minimizing the generation of unusable waste. Thus, this study aimed to evaluate the influence of replacing part of the coarse fraction of an asphalt mixture with RAP, for different binder contents. For this evaluation, HT-IDT (High Temperature Indirect Tensile) and IDEAL CT (Indirect Tensile Asphalt Cracking Test) were performed to analyze the propensity for permanent deformation and susceptibility to fatigue cracking. The main conclusion of the study is that the incorporation of RAP is technically feasible, with the recycled mixtures showing equivalent — and in some cases, superior — performance compared to conventional mixtures, especially regarding cracking potential. However, attention must be paid to resistance to permanent deformation, due to the possible increase in effective binder content.

**Keywords:** RAP. Asphalt mixtures. HT-IDT. IDEAL CT. Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Local da coleta (a); Aspecto material graúdo (b) e Aspecto material fino (c).....  | 11 |
| Figura 2 – Fracionamento de RAP. ....   | 12 |
| Figura 3 - Distribuição granulométrica da mistura de referência, do RAP e Faixa C do DNIT.<br>.....   | 13 |
| Figura 4 – Ensaio HT-IDT .....  | 14 |
| Figura 5 – Condicionamento dos CP's em banho-maria na temperatura de 50°C.....  | 15 |
| Figura 6 – Monitoramento dos CP's para ensaio. ....   | 17 |
| Figura 7 – Gráfico padrão do ensaio HT-IDT. ....  | 20 |
| Figura 8 – Resultados médios de HT-IDT para as misturas de referência (0% de RAP) em<br>função do teor de asfalto e das categorias propostas por Christensen e Bonaquist (2007). .... | 21 |
| Figura 9 - Resultados médios de HT-IDT para as misturas com 15% de RAP) em função do<br>teor de asfalto e das categorias propostas por Christensen e Bonaquist (2007). ....           | 23 |
| Figura 10 – Resultados médios de HT-IDT para as misturas de referência e com 15% de RAP<br>em função do teor de asfalto.....  | 24 |
| Figura 11 - Resultados médios de $CT_{Index}$ para as misturas de referência em função do teor de<br>asfalto e indicação de utilização do TDOT. ....                                  | 25 |
| Figura 12 – Resultados médios de $CT_{Index}$ para as misturas com 15% de RAP em função do teor<br>de asfalto e indicação de utilização do TDOT.....                                  | 27 |
| Figura 13 - Resultados médios de $CT_{Index}$ para as misturas sem e com material fresado em<br>função do teor de asfalto.....  | 28 |
| Figura 14 - Resultados médios de HT-IDT e $CT_{Index}$ para as misturas de referência em função<br>do teor de asfalto e com indicação do teor de projeto Marshall. ....               | 29 |
| Figura 15 - Resultados médios de HT-IDT e $CT_{Index}$ para as misturas com RAP em função do<br>teor de asfalto e com indicação do teor de projeto Marshall. ....                     | 29 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Caracterização dos agregados utilizados. ....  | 10 |
| Tabela 2 – Caracterização do AMP 60/85-E. ....  | 10 |
| Tabela 3 – Categoria das misturas asfálticas quanto ao comportamento à deformação permanente nos ensaios de HT-IDT em função do nível de tráfego. ....                  | 16 |
| Tabela 4 - Valores de referência para utilização de misturas asfálticas quanto ao potencial de trincamento determinado pelos ensaios de IDEAL CT ( $CT_{Index}$ ). .... | 18 |
| Tabela 5 - Resultados de HT-IDT para as misturas de referência (0% de RAP) em função do teor de asfalto.....  | 20 |
| Tabela 6 – Resultados de HT-IDT para as misturas com 15% de RAP em função do teor de asfalto. ....  | 22 |
| Tabela 7 – Resultados de $CT_{Index}$ para as misturas de referência em função do teor de asfalto. ....   | 25 |
| Tabela 8 - Resultados de $CT_{Index}$ para as misturas elaboradas com material fresado em função do teor de asfalto.....  | 26 |

## SUMÁRIO

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1   | INTRODUÇÃO.....  | 8  |
| 2   | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....   | 9  |
| 3   | MATERIAIS E MÉTODOS .....  | 10 |
| 3.1 | Ensaaios de HT-IDT .....   | 13 |
| 3.2 | Ensaaios de IDEAL CT.....  | 16 |
| 4   | APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....                                  | 19 |
| 4.1 | Avaliação do potencial de deformação permanente por ensaio de HT-IDT ..... | 19 |
| 4.2 | Avaliação do potencial de trincamento por ensaio de IDEAL CT.....          | 24 |
| 5   | CONCLUSÃO.....   | 32 |
|     | REFERÊNCIAS .....  | 34 |

## 1 INTRODUÇÃO

O revestimento asfáltico é a camada superficial dos pavimentos rodoviários, responsável por suportar o contato direto dos pneus dos veículos, resistir a diversas condições climáticas e garantir conforto e segurança aos usuários (BERNUCCI *et al.*, 2022). Devido ao desgaste contínuo, intervenções periódicas são necessárias para restabelecer as condições de utilização. A fresagem, técnica amplamente utilizada em projetos de recuperação de pavimentos asfálticos, produz o material fresado, composto por agregados e ligante asfáltico envelhecido, que quando beneficiado é conhecido como RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*). Esse material pode ser reutilizado na produção de novas misturas asfálticas, seja como substituto parcial ou total de agregados virgens.

A utilização do RAP em misturas asfálticas tem se consolidado como uma prática sustentável e economicamente viável, especialmente no contexto atual de incentivo à reciclagem de pavimentos. Essa abordagem reduz a exploração de recursos naturais, diminui o volume de resíduos e contribui para a economia nos custos de produção (WEST *et al.*, 2013). Nos Estados Unidos, em 2021, mais de 97% dos 101,3 milhões de toneladas de RAP retornaram aos produtores de misturas asfálticas, sendo que cerca de 95 milhões de toneladas foram recicladas diretamente em novas misturas, aproximadamente 2,1 milhões de toneladas (2,1%) foram estocadas para uso futuro e apenas 101 mil toneladas (0,1%) foram destinadas a aterros (WILLIAMS *et al.*, 2022 apud NAPA, 2024, p. 25). No Brasil, Lopes *et al.* (2024) apontam que, entre 2019 e 2021, cerca de 2,1 milhões de toneladas de RAP foram produzidas anualmente a partir de rodovias administradas pelo DNIT e por concessionárias privadas. No entanto, apenas 0,7% desse volume foi reciclado, sendo o restante estocado ou doado, o que contrasta com as diretrizes da Resolução nº 14 do DNIT (2021), que recomenda seu uso em obras de restauração, adequação de capacidade e ampliação de rodovias.

Diante desse cenário, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar os efeitos da substituição parcial da fração gráuda de um agregado basáltico por 15% de RAP em misturas asfálticas densas, variando-se os teores de ligante. A investigação teve como foco a análise da propensão à deformação permanente e à suscetibilidade ao trincamento por fadiga, por meio dos ensaios HT-IDT (*Indirect Tensile Test at High Temperature*) e IDEAL-CT (*Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature*), respectivamente. A escolha desses métodos



considerou sua praticidade, baixo custo e a viabilidade de execução em diferentes contextos, inclusive em obras afastadas de centros com infraestrutura laboratorial sofisticada.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a elaboração deste trabalho, as referências bibliográficas utilizadas baseiam-se em estudos nacionais e internacionais. A incorporação de RAP em misturas asfálticas apresenta vantagens técnicas comprovadas por diversos estudos. Centofante (2016) observou maior resistência à deformação permanente em misturas com RAP, por meio do ensaio *Flow Number* (FN). De forma semelhante, Suzuki (2019) verificou melhora na resistência à deformação e aumento na vida de fadiga com o uso de 50% de RAP em conjunto com agente rejuvenescedor, utilizando ensaios de FN e flexão em viga de quatro apoios. No entanto, a formulação de misturas recicladas enfrenta desafios técnicos significativos, como a variabilidade do RAP, sua granulometria irregular, o teor de umidade e a interação entre ligante envelhecido e novo, fatores que podem comprometer a qualidade da mistura final.

Diante desses desafios, torna-se necessário o uso de ensaios que avaliem de forma prática e eficiente as propriedades críticas das misturas com RAP, especialmente a resistência à deformação permanente e ao trincamento por fadiga. Nesse contexto, os ensaios HT-IDT e IDEAL CT surgem como alternativas promissoras. O HT-IDT tem sido considerado uma opção viável ao ensaio APA (*Asphalt Pavement Analyzer*), sendo adotado inclusive pelo Departamento de Transportes da Virgínia (BOZ *et al.*, 2023). Já o IDEAL CT, desenvolvido por Zhou (2019), destaca-se como alternativa mais prática em relação aos ensaios *Overlay Test* (Tex-248-F) e *Illinois Flexibility Index Test* (I-FIT) por dispensar etapas complexas de preparação das amostras, como cortes ou entalhes, e por utilizar equipamentos comuns em laboratórios de pavimentação.

A utilização desses ensaios é particularmente relevante no contexto brasileiro, onde a redução de custos e a agilidade nas análises são fatores decisivos para a implementação de soluções técnicas em obras de menor investimento ou distante de grandes centros. A possibilidade de execução dos ensaios com uso da prensa Marshall, equipamento amplamente disponível nos laboratórios nacionais, reforça a viabilidade dessa abordagem. Assim, acredita-se que a consolidação dos ensaios HT-IDT e IDEAL CT pode contribuir significativamente para o aumento do uso do RAP nas misturas asfálticas brasileiras, promovendo economia, desempenho técnico e sustentabilidade nas obras viárias.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os agregados virgens utilizados nas misturas asfálticas são de origem basáltica, provenientes da pedreira localizada no distrito industrial de Uberlândia-MG. Foram utilizados brita 0, brita 1 e pó de pedra. Como filer, adicionou-se cal hidratada CH-I para melhorar a adesividade entre agregados e ligante. O ligante asfáltico utilizado foi um modificado por polímero (AMP) de classificação 60/85-E de PG 76-22. As misturas asfálticas produzidas são do tipo densa grossa (NAPA e FHWA, 2001), com tamanho máximo nominal (TMN) de 12,5 mm e enquadram-se na Faixa C do DNIT. Na Tabela 1 são apresentados os resultados de caracterização do agregado utilizado e na Tabela 2 a caracterização do cimento asfáltico de petróleo (CAP) modificado.

Tabela 1 – Caracterização dos agregados utilizados.

| Ensaio               | Resultado | Valor de Referência | Método         |
|----------------------|-----------|---------------------|----------------|
| Abrasão Los Angeles  | 12,5%     | < 50%               | ABNT NBR NM 51 |
| Índice de Forma      | 2         | $\leq 2$            | ABNT NBR 7809  |
| Equivalente de areia | 83%       | > 35%               | ABNT NBR 12052 |
| Durabilidade         | 26%       | $\leq 30\%$         | ASTM C88       |

Fonte: Santos (2019).

Tabela 2 – Caracterização do AMP 60/85-E.

| Ensaio                            | Resultado | Valor de Referência | Unidade            | Método    |
|-----------------------------------|-----------|---------------------|--------------------|-----------|
| Penetração a 25°C, 100g, 5s       | 50        | 40 a 70             | 0,1mm              | NBR 6576  |
| Ponto de amolecimento             | 67,5      | $\geq 60$           | ° C                | NBR 6560  |
| Recuperação Elástica, 20cm, 25° C | 90        | $\geq 85$           | %                  | NBR 15086 |
| Viscosidade Brookfield, a 135° C  | 1.325     | < 3.000             | cP                 | NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield, a 155° C  | 759       | < 2.000             | cP                 | NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield, a 175° C  | 281       | < 1.000             | cP                 | NBR 15184 |
| Ponto de Fulgor                   | 295       | $\geq 235$          | ° C                | NBR 11341 |
| Ensaio de Separação de Fase       | 1.1       | < 5                 | $\Delta$ P.A. (°C) | NBR 15166 |
| Massa específica a 25°C           | 1,003     | -                   | Kg/m <sup>3</sup>  | NBR 6296  |

Fonte: Dados do fabricante (2025).

O RAP foi coletado de um estoque de material fresado pertencente à concessionária Ecovias Cerrado, localizado no km 649, pista Leste da BR-365 e sendo resultado do processo de fresagem a frio. Conforme mostra a Figura 1a, o estoque consistia exclusivamente de material asfáltico fresado, sem contaminação por outros materiais, apresentando visualmente duas frações distintas: uma mais graúda e outra mais fina (Figuras 1b e 1c). Para garantir representatividade, foram coletadas amostras em três pontos diferentes da pilha em todo perímetro (topo, meio e base) utilizando pá mecânica. O material foi homogeneizado, condicionado em sacos plásticos e transportado ao laboratório, totalizando aproximadamente

100 kg. Segundo Bonfim (2010), a fresagem a frio - realizada em temperatura ambiente sem pré-aquecimento do pavimento - resulta na quebra parcial dos agregados e alteração granulométrica, o que explica a presença significativa de finos no material coletado.

Figura 1 – Local da coleta (a); Aspecto material graúdo (b) e Aspecto material fino (c).



Fonte: Autor (2025).

Para a caracterização do RAP foram realizados os seguintes ensaios: determinação da massa específica máxima medida (Gmm) conforme a norma DNIT 427/2020 - ME, análise granulométrica (antes e após extração do ligante) de acordo com a norma DNIT 412/2019 - ME

e determinação do teor de ligante seguindo a norma DNER-ME 053/94. A Gmm média do material fresado foi de  $2,736 \text{ g/cm}^3$  e o teor de asfalto médio de 4,61%.

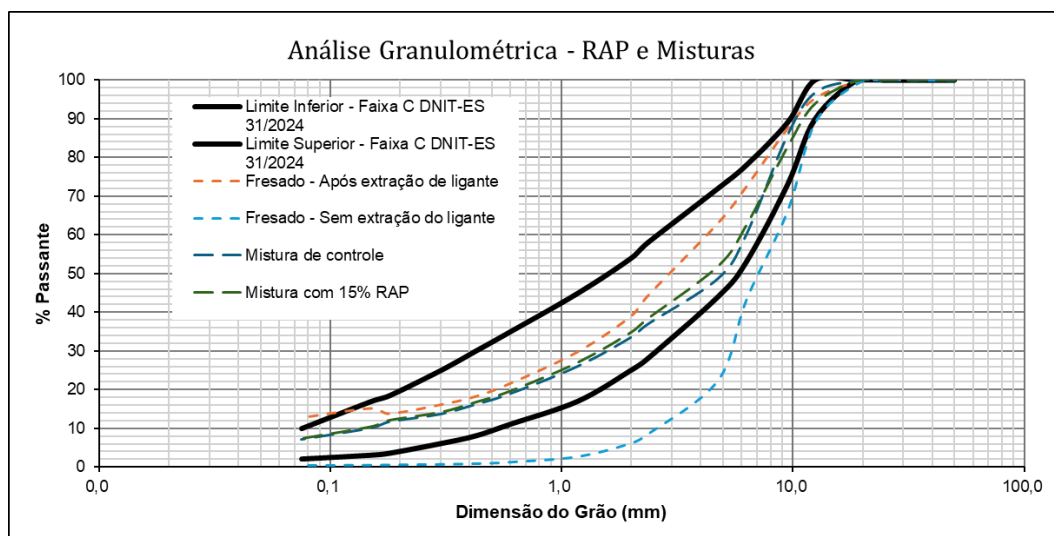
O RAP foi fracionado em dois grupos: i. material retido na peneira de 4,8 mm e; ii. material passante na peneira de 4,8 mm, conforme Figura 2. O material retido foi utilizado como agregado (“black rock”), representando 15% do peso total da mistura, o que permitiu atingir uma curva granulométrica próxima à da mistura de referência. A análise comparativa das curvas granulométricas das misturas com e sem RAP indicou que essa substituição de 15% do RAP corresponde à substituição de 31% da fração graúda da mistura de referência. Na Figura 3 é apresentada a distribuição granulométrica das misturas com os limites da Faixa C do DNIT (DNIT, 2024).

Figura 2 – Fracionamento de RAP.



Fonte: Autor (2025).

Figura 3 - Distribuição granulométrica da mistura de referência, do RAP e Faixa C do DNIT.



Fonte: Autor (2025).

Na formulação da mistura asfáltica de referência os agregados foram aquecidos a 175°C, o ligante asfáltico a 162,5°C e a compactação foi realizada a 145°C. Para a mistura com RAP, o material fresado foi previamente porcionado em amostras de 1.000 a 2.000 g e, em seguida, condicionado em estufa a 60°C por 24 horas, até que se atingisse a constância de peso. Após a remoção da umidade, o RAP foi pesado e deixado à temperatura ambiente, sendo misturado com os agregados superaquecidos a 185°C. O método de transferência de calor foi utilizado para garantir que o RAP atingisse a temperatura necessária para a mistura. A mistura dos materiais foi realizada de forma manual, seguindo a norma DNIT 178/2018-Pro, que estabelece os procedimentos para a preparação de corpos de prova usando o compactador Marshall.

Os corpos de prova (CPs) foram moldados com asfalto modificado em teores de 4%, 5% e 6%, com três amostras preparadas para cada teor por tipo de ensaio. A moldagem foi realizada com um objetivo de volume de vazios alvo (Vv) de  $7 \pm 0,5\%$  para a mistura de referência. No entanto, para as amostras com RAP, o Vv alvo foi de  $8 \pm 0,5\%$  devido às características do material fresado.

### 3.1 Ensaios de HT-IDT

O ensaio HT-IDT foi utilizado para avaliar a propensão à deformação permanente das misturas asfálticas. O teste consiste na aplicação de uma taxa de carregamento de 50 mm/min no deslocamento axial aplicado no plano diametral de amostras cilíndricas, conforme Figura 4.



Os CPs foram condicionados em banho-maria a uma temperatura de 50°C por 2h, conforme recomendado por Christensen e Ray Bonaquist (2007), que indicam a realização do teste a 10°C abaixo da temperatura crítica do pavimento. O ensaio é caracterizado por sua simplicidade, rapidez, repetibilidade e boa correlação com outros testes fundamentais e com o desempenho observado em campo. Boz *et al.* (2023) destacam que o ensaio HT-IDT tem se mostrado uma alternativa eficaz aos testes tradicionais de avaliação de deformação permanente, sem comprometer a confiabilidade dos resultados.

Figura 4 – Ensaio HT-IDT



Fonte: Autor (2025).

A escolha do banho-maria foi fundamentada na sua facilidade de uso e na velocidade com que as amostras atingem a temperatura de teste. Segundo Boz *et al.* (2025), o condicionamento em banho-maria é significativamente mais rápido que o realizado em câmara ambiental. Em seu estudo, verificou-se que as amostras condicionadas em banho-maria atingiram a temperatura de teste em apenas 47,5 minutos, enquanto as amostras em câmara ambiental levaram 175 minutos para atingir a mesma temperatura. Para este estudo, as amostras foram condicionadas em seu estado natural, sem a proteção de filmes plásticos ou outros materiais, visando simular condições mais próximas da realidade (Figura 5). O tempo de

condicionamento de 2 horas foi escolhido com base nas observações laboratoriais realizadas e na padronização adotada em outros ensaios, como o IDEAL CT, que também utiliza esse tempo de condicionamento. Essa decisão buscou garantir que as amostras atingissem um estado de equilíbrio térmico adequado, mantendo a consistência e a uniformidade dos resultados, além de se alinhar com práticas já estabelecidas em testes similares.

Figura 5 – Condicionamento dos CP's em banho-maria na temperatura de 50°C.



Fonte: Autor (2025).

A partir dos resultados obtidos, foram elaborados os gráficos de deslocamento por carga. A resistência à deformação permanente é calculada em função da carga máxima de ruptura e das dimensões do CP como apresentado na Equação 1.

$$\sigma_{HT-IDT} = \frac{2 P_{max}}{\pi x t x D} \quad \text{eq.(1)}$$

Onde:

$\sigma_{HT-IDT}$  é resistência à tração indireta [kgf/cm<sup>2</sup>];

$P_{max}$  é a carga máxima [kgf];

$t$  é a espessura do corpo de prova [cm];

D é o diâmetro do corpo de prova [cm].

A carga máxima é determinada pelo ponto de falha da amostra durante a aplicação da carga. A espessura e o diâmetro são medidos diretamente nas amostras antes da realização do ensaio. Assim, quanto maior o valor calculado para  $\sigma_{HT-IDT}$ , maior será a resistência da mistura à deformação permanente. Na Tabela 3 são apresentadas as classes de misturas asfálticas quanto ao resultado de  $\sigma_{HT-IDT}$  em função do nível de tráfego de acordo com Christensen e Bonaquist (2007).

Tabela 3 – Categoria das misturas asfálticas quanto ao comportamento à deformação permanente nos ensaios de HT-IDT em função do nível de tráfego.

| Nível de Tráfego ( $10^6$ )* | Categoria de Resistência<br>à Deformação Permanente | Faixa de $\sigma_{HT-IDT}$ (kPa) |
|------------------------------|---|----------------------------------|
| -                            | Muito fraca   | < 50                             |
| < 0,3                        | Fraca   | 50 < 110                         |
| 0,3 < 3                      | Mínima  | 110 < 170                        |
| 3 < 10                       | Regular   | 170 < 270                        |
| 10 < 30                      | Boa   | 270 < 430                        |
| 30 < 100                     | Muito Boa   | 430 < 660                        |
| 100 < 300                    | Excelente   | $\geq 660$                       |

\* A 70 km/h. Para ajustar o nível de tráfego estimado a 70 km/h, multiplicar por  $70/v$  ( $v$  é a velocidade média do tráfego em km/h).

Fonte: Christensen e Bonaquist (2007).

Boz *et al.* (2025) estabeleceram um valor mínimo de resistência de 100 kPa para misturas densas grossas com asfalto não modificado. Em complementação, o estudo de Yin e West (2021) indica um valor de referência de 137,9 kPa para misturas destinadas a tráfego pesado (10M ESALs), com CPs moldados com 7% de volume de vazios, altura de 62 mm e condicionados a 50°C.

### 3.2 Ensaios de IDEAL CT

O ensaio IDEAL CT foi utilizado para avaliar a suscetibilidade das misturas asfálticas ao trincamento. O teste é realizado em amostras cilíndricas à temperatura de 25°C e com uma taxa de carregamento de 50 mm/min, utilizando uma estrutura de carregamento de tração indireta, como a prensa Marshall. Conforme descrito por Zhou (2019), o ensaio é caracterizado por sua simplicidade, praticidade, eficiência e boa relação com o desempenho em campo. Além



disso, não requer cortes, entalhes ou instrumentação complexa nas amostras, o que facilita sua execução em laboratórios.

O ensaio é normatizado pela norma ASTM D8225-19, que descreve os procedimentos para preparação, execução e análise de amostras cilíndricas de misturas asfálticas. A norma recomenda o uso de CPs moldados pelo método Superpave, com diâmetro de  $150 \pm 2$  mm e altura de  $62 \pm 1$  mm. No entanto, utilizou-se o procedimento proposto por Santana e Leandro (2024) que sugerem a utilização de CPs Marshall pelo fato de que, no cenário brasileiro, a moldagem de amostras de maior dimensão em compactadores giratórios não é acessível na maioria das regiões. Desse modo, para esse trabalho, foram moldadas 18 amostras por compactação Marshall com volume de vazios alvo de 7% ( $\pm 0,5\%$ ), os quais foram condicionados por 2h em uma sala com monitoramento de temperatura (Figura 6). Segundo Zhou (2019), o uso de diferentes dimensões para as amostras não representa um problema, uma vez que é possível testar CPs com diâmetros variados (100 ou 150 mm) e alturas distintas (38, 50, 62 e 75 mm), conforme as necessidades do estudo.

Figura 6 – Monitoramento dos CP's para ensaio.



Fonte: Autor (2025).

O  $CT_{Index}$  (*Cracking Tolerance Index*) é o parâmetro utilizado para avaliar a resistência à fissuração das misturas asfálticas. Ele é calculado com base em três componentes principais: a energia de fratura (Gf), a inclinação pós-pico (m75) e a tolerância à deformação (I75). A energia de fratura é obtida a partir da área sob a curva carga-deslocamento, que representa a

energia necessária para propagar uma fissura. A inclinação pós-pico é determinada no ponto correspondente a 75% da carga máxima após o pico, enquanto a tolerância à deformação é o deslocamento nesse mesmo ponto. O  $CT_{Index}$  pode ser determinado pela utilização da Equação 2.

$$CT_{Index} = \frac{t}{62} \times \frac{G_f}{|m_{75}|} \times \frac{l_{75}}{D} \times 10^6 \quad \text{eq. 2}$$

Onde:

$CT_{Index}$  é o índice de tolerância à fissuração;

t é a espessura da amostra [mm];

$G_f$  é a energia de falha [ $J/m^2$ ];

$m_{75}$  é o valor absoluto da inclinação pós – pico [N/m];

$l_{75}$  é o deslocamento a 75% da carga pico [mm];

D é o diâmetro da amostra [mm].

Quanto maior o valor do  $CT_{Index}$ , maior a resistência à fissuração da mistura asfáltica. Esse índice é amplamente utilizado para identificar misturas propensas a fissuras durante o projeto de misturas e no controle de qualidade (Zhou, 2019).

Conforme estabelecido no “*Balanced Mix Design Resource Guide*” (NAPA, 2021), os valores de referência para avaliação do  $CT_{Index}$  são baseados em ensaios com misturas submetidas a 4 horas de envelhecimento de curto prazo em estufa a 135 °C antes da compactação. Neste estudo, adotou-se um período de condicionamento reduzido, de 2 horas, conforme o critério estabelecido na norma do DNIT ES-031 (2024). Na Tabela 4 são apresentados os valores de referência para a utilização de misturas asfálticas quanto ao potencial de trincamento, por meio da avaliação do  $CT_{Index}$ .

Tabela 4 - Valores de referência para utilização de misturas asfálticas quanto ao potencial de trincamento determinado pelos ensaios de IDEAL CT ( $CT_{Index}$ ).

| Agência ou Autor   | $CT_{Index}$ | Indicação de Uso                                 | Observações               |
|--------------------|--------------|--|---------------------------|
| Virginia DOT       | $\geq 50$    | Misturas convencionais                           | Valor base para avaliação |
| Tennessee DOT      | $\geq 75$    | Rodovias estaduais com VDM <sup>1</sup> > 10.000 | Compactação Marshall      |
| Oklahoma DOT       | $\geq 80$    |  |                           |
| Zhou et al. (2020) | $\geq 90$    | Para todos os tipos de misturas densas           | Critério de aceitação     |

|                     |            |                                     |
|---------------------|------------|-------------------------------------|
| Texas DOT<br>(TDOT) | $\geq 50$  | Rodovias estaduais com VDM < 10.000 |
|                     | $\geq 75$  | Rotas estaduais com VDM > 10.000    |
|                     | $\geq 100$ | Rodovias interestaduais             |

<sup>1</sup> VDM: Volume diário médio

Fonte: adaptado de NAPA (2021).

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

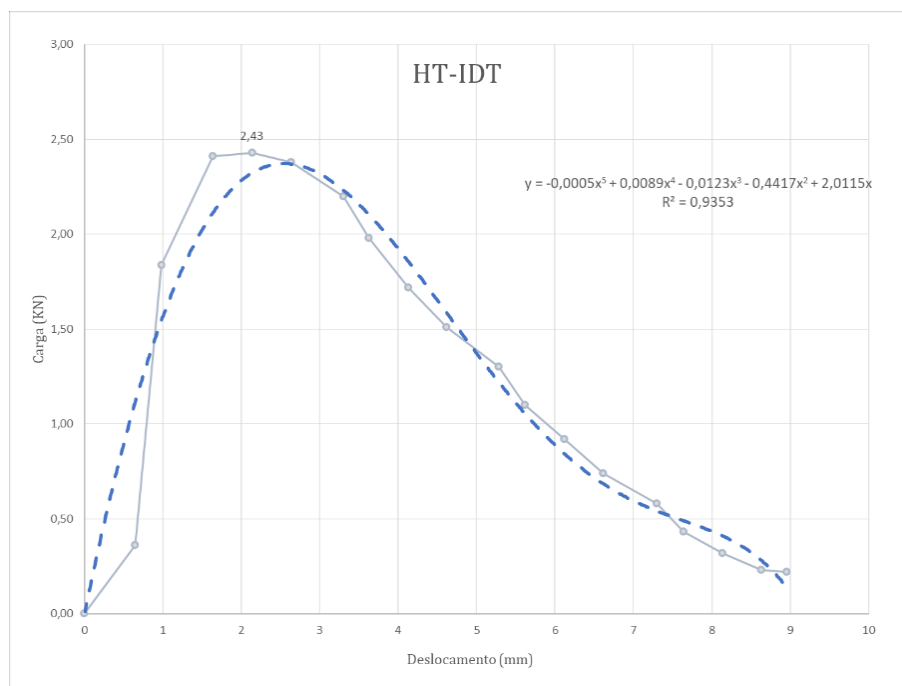
Os resultados dos ensaios de HT-IDT e IDEAL CT são resumidos nesta seção e apresentados em função da variação do teor de asfalto. Para cada um dos teores de ligante foram realizadas no mínimo três réplicas. Para a identificação de *outliers*, foi desenvolvida uma sistemática baseada na integração dos testes de Grubbs, Dixon e Hampel, priorizando a robustez e a clareza na tomada de decisão. Os métodos consistem em: (1) ordenar os dados; (2) calcular estatísticas descritivas (média, desvio padrão, mediana e MAD - Desvio Absoluto Mediano); (3) aplicar sequencialmente os testes, com prioridade para o valor mais extremo.

O teste de Grubbs avalia afastamentos da média em unidades de desvio padrão (limiar:  $G > 1,154$  para  $n=3$ ,  $\alpha=0,05$ ), enquanto o teste Q de Dixon verifica a razão entre distâncias (limiar:  $Q > 0,941$ ). Já o critério de Hampel (baseado na mediana e MAD) considera *outliers* valores além de  $\pm 2,5 \times \text{MAD}$ . A função, implementada em VBA/Excel, retorna explicitamente o valor outlier e o método que o identificou. Essa abordagem é particularmente útil em análises laboratoriais, garantindo transparência e reprodutibilidade na exclusão de dados discrepantes, sem descartar a avaliação contextual do experimento.

### 4.1 Avaliação do potencial de deformação permanente por ensaio de HT-IDT

A avaliação da resistência à deformação permanente das misturas asfálticas foi realizada por meio do ensaio HT-IDT, com a mensuração da carga máxima aplicada. Os dados foram obtidos utilizando-se o sistema próprio da prensa Marshall, com uma taxa de aquisição de 0,025 segundos por ponto. As curvas resultantes foram ajustadas para apresentar o formato característico em sino, conforme Figura 7.

Figura 7 – Gráfico padrão do ensaio HT-IDT.



Fonte: Autor (2025).

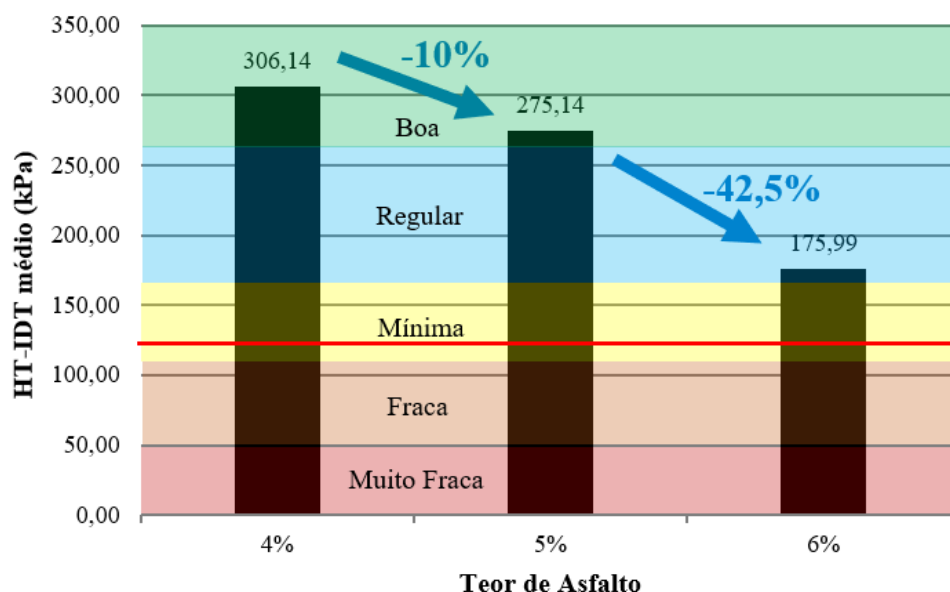
Na Tabela 5, são apresentados os resultados do ensaio HT-IDT para as misturas de referência (0% de RAP), em função do teor de ligante, incluindo a identificação de valores atípicos (outliers). Já na Figura 8, são apresentados os valores médios de HT-IDT. Os corpos de prova (CPs) foram moldados com um volume de vazios (Vv) alvo de  $7\% \pm 0,5\%$ .

Tabela 5 - Resultados de HT-IDT para as misturas de referência (0% de RAP) em função do teor de asfalto.

| Teor de Asfalto (%) | CP | HT-IDT kPa | Média kPa | Desvio Padrão kPa | Outlier | HT-IDT Médio kPa |
|---------------------|----|------------|-----------|-------------------|---------|------------------|
| 4%                  | C1 | 353,25     | 321,84    | 27,54             | Sim     | 306,14           |
|                     | C2 | 310,43     |           |                   | Não     |                  |
|                     | C3 | 301,84     |           |                   | Não     |                  |
| 5%                  | C4 | 280,38     | 242,91    | 56,08             | Não     | 275,14           |
|                     | C5 | 269,91     |           |                   | Não     |                  |
|                     | C6 | 178,44     |           |                   | Sim     |                  |
| 6%                  | C7 | 176,27     | 184,00    | 13,88             | Não     | 175,99           |
|                     | C8 | 175,70     |           |                   | Não     |                  |
|                     | C9 | 200,01     |           |                   | Sim     |                  |

Fonte: Autor (2025).

Figura 8 – Resultados médios de HT-IDT para as misturas de referência (0% de RAP) em função do teor de asfalto e das categorias propostas por Christensen e Bonaquist (2007).



Fonte: Autor (2025).

Analisando os resultados apresentados na Tabela 5, observa-se uma relação inversamente proporcional entre o teor de ligante e a resistência à deformação permanente, o que já era esperado devido à maior quantidade de asfalto presente nas misturas. Os valores de HT-IDT diminuíram progressivamente de 306,14 kPa (4% de CAP) para 175,99 kPa (6% de CAP).

Adicionalmente, a análise da Figura 8 indica que o aumento no teor de CAP de 4% para 5% e 6% exerce um efeito determinante sobre o comportamento da mistura em relação ao seu potencial de resistência à deformação permanente, uma vez que, para os teores mais elevados de ligante (5% e 6%), verificou-se uma redução nos valores de HT-IDT de até 42,5%.

Ainda com base na Figura 8, constata-se que, até o teor de 5%, as misturas apresentaram desempenho característico da classe “Boa”, segundo o critério de Christensen e Bonaquist (2007). Por outro lado, o aumento do teor de asfalto para 6% classifica a mistura como “Regular”. Dessa forma, as misturas com até 5% de ligante são recomendadas para aplicações em pavimentos sujeitos a tráfego pesado ( $\geq 10^7$  repetições), conforme os critérios da NAPA e FHWA (2001), enquanto a mistura com maior teor de asfalto (6%) é indicada, no máximo, para

pavimentos com tráfego médio ( $< 10^7$  repetições). Pelo critério de Yin e West (2021), todas as misturas testadas atenderiam ao critério utilizado para tráfego pesado ( $\text{HT-IDT} \geq 137,9 \text{ kPa}$ ).

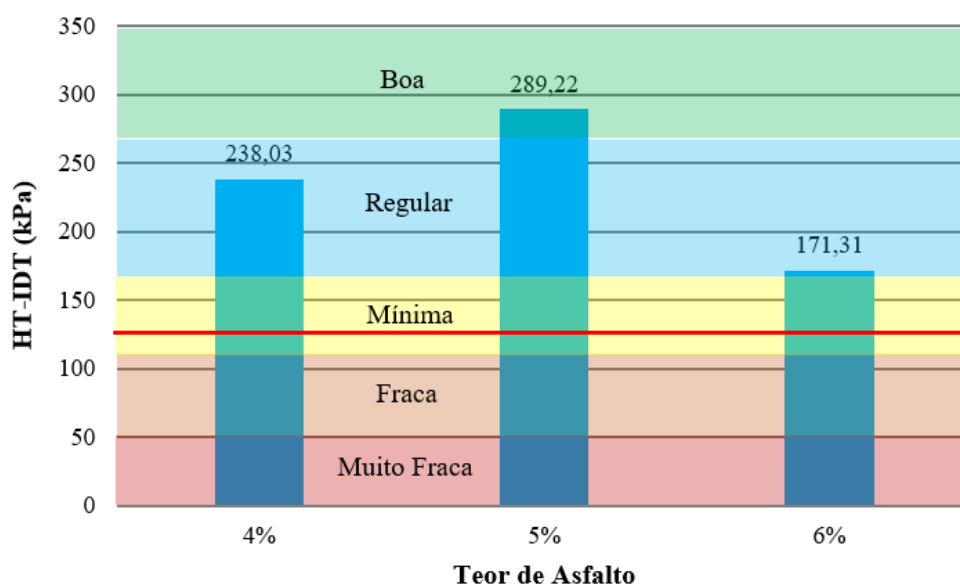
No que diz respeito às misturas com incorporação de 15% RAP em substituição do peso total à distribuição granulométrica de referência, necessitou-se realizar o ajuste do Vv alvo para  $8\% \pm 0,5\%$  dos CPs com 5 e 6% de asfalto e para os CPs com 4% não foi possível obter essa faixa, alcançando-se o mínimo 10,5% de Vv. Esse fato pode ser explicado pelo efeito dos grumos de material fresado que apresentam características de forma, textura e absorção diferentes dos agregados de referência. Na Tabela 6 são apresentados os resultados de HT-IDT para as misturas com fresado e na Figura 9 são mostrados os valores médios de HT-IDT e categoria de resistência à deformação permanente de acordo com os critérios de Christensen e Bonaquist (2007).

Tabela 6 – Resultados de HT-IDT para as misturas com 15% de RAP em função do teor de asfalto.

| Teor de Asfalto (%) | CP  | HT-IDT kPa | Média kPa | Desvio Padrão kPa | Outlier | HT-IDT Médio kPa |
|---------------------|-----|------------|-----------|-------------------|---------|------------------|
| 4%                  | F1  | 244,34     | 242,10    | 11,43             | Não     | 238,03           |
|                     | F2  | 243,83     |           |                   | Não     |                  |
|                     | F3  | 227,32     |           |                   | Não     |                  |
|                     | F4  | 258,41     |           |                   | Sim     |                  |
|                     | F5  | 236,62     |           |                   | Não     |                  |
| 5%                  | F6  | 272,91     | 289,22    | 18,73             | Não     | 289,22           |
|                     | F7  | 309,67     |           |                   | Não     |                  |
|                     | F8  | 285,09     |           |                   | Não     |                  |
| 6%                  | F9  | 183,72     | 171,31    | 32,25             | Não     | 171,31           |
|                     | F10 | 209,60     |           |                   | Não     |                  |
|                     | F11 | 156,30     |           |                   | Não     |                  |
|                     | F12 | 135,61     |           |                   | Não     |                  |

Fonte: Autor (2025).

Figura 9 - Resultados médios de HT-IDT para as misturas com 15% de RAP) em função do teor de asfalto e das categorias propostas por Christensen e Bonaquist (2007).



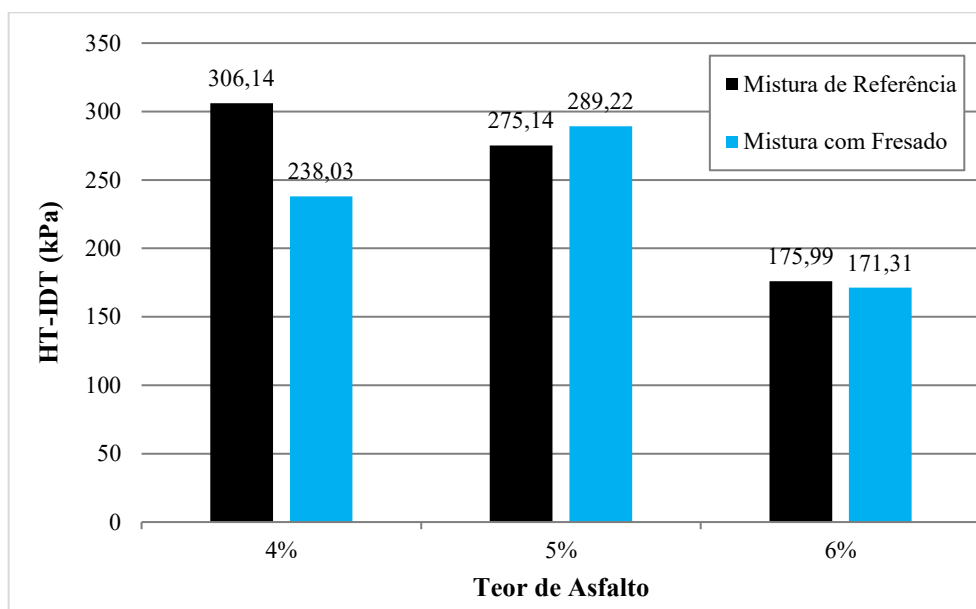
Fonte: Autor (2025).

A partir da análise da Tabela 6, observa-se que os resultados da mistura com adição de 15% de RAP apresentaram tendência semelhante à verificada na mistura de referência (Tabela 5), com exceção da condição com 4% de teor de asfalto, que apresentou valor de HT-IDT inferior ao observado na mistura com 5% de ligante. Esse comportamento pode ser atribuído ao maior Vv dos CPs (10,5%) nessa condição em comparação ao Vv de 8% dos CPs da mistura asfáltica com 5% de ligante.

Para os demais teores de asfalto (5% e 6%), a tendência de redução da resistência à deformação permanente foi semelhante àquela observada nas misturas de referência (Tabela 5 e Figura 8). Verificou-se uma redução de 41% nos valores de HT-IDT da mistura com 6% de asfalto em relação àquela com 5%. Esse comportamento torna-se ainda mais evidente por meio da Figura 9, notando-se que as misturas com menor teor de ligante (4% e 5%) apresentaram maior resistência à deformação permanente, sendo, portanto, potencialmente adequadas para aplicação em vias de tráfego pesado, conforme os critérios estabelecidos pela NAPA e FHWA (2001). Em contrapartida, a mistura com maior teor de asfalto (6%) apresentaria restrição de uso, sendo recomendada apenas para condições de tráfego médio. Porém, segundo Yin e West (2021) misturas que apresentem valor de HT-IDT igual ou maior que 137,9 kPa podem ter

indicação de uso para pavimentos de tráfego pesado. Na Figura 10 são mostrados os resultados de HT-IDT para os dois cenários de mistura: com e sem material fresado.

Figura 10 – Resultados médios de HT-IDT para as misturas de referência e com 15% de RAP em função do teor de asfalto.



Fonte: Autor (2025).

A análise da Figura 10 permite inferir que a substituição de 15% do peso total da mistura por RAP não exerceu influência significativa sobre o comportamento relacionado à resistência à deformação permanente, especialmente para os teores de asfalto de 5% e 6%. No entanto, para o teor de 4%, observa-se uma redução no valor de HT-IDT da mistura com material fresado em comparação à mistura de referência da ordem de 22%. Tal comportamento pode ser atribuído à diferença no volume de vazios dos corpos de prova, sendo de 7% ( $\pm 0,5\%$ ) na mistura de referência e de 10,5% ( $\pm 0,5\%$ ) na mistura com fresado.

#### 4.2 Avaliação do potencial de trincamento por ensaio de IDEAL CT

A avaliação do potencial de trincamento das misturas asfálticas foi realizada por meio do ensaio IDEAL CT, seguindo a norma ASTM D8225-19 e as modificações propostas por Santana e Leandro (2024) que utilizaram CPs Marshall para a realização dos ensaios. Os pontos de carga e deslocamento foram registrados pelo sistema da prensa, com taxa de aquisição de 0,025 s/ponto.



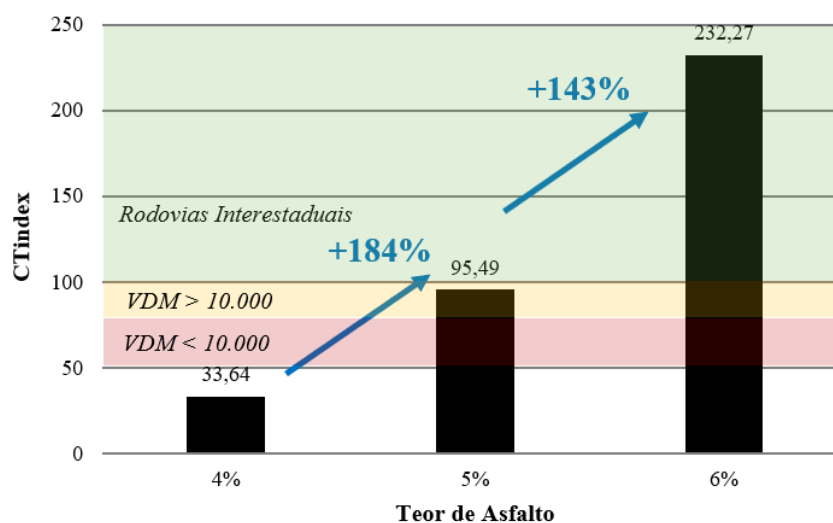
Os CPs da mistura de referência foram provenientes do processo de dosagem Marshall, logo os valores de Vv variaram de 9,13% (4% CAP) para 3% (6% CAP), obtendo como teor de asfalto de projeto 5,55%. Na Tabela 7 são apresentados os resultados de  $CT_{Index}$  para as misturas elaboradas com o agregado de referência e na Figura 11 são mostrados os valores médios de  $CT_{Index}$  e o limite de aceitabilidade proposto por *Texas Department of Transportation* – TDOT (NAPA, 2021).

Tabela 7 – Resultados de  $CT_{Index}$  para as misturas de referência em função do teor de asfalto.

| Teor de Asfalto (%) | CP | $CT_{Index}$ | Média kPa | Desvio Padrão kPa | Outlier | $CT_{Index}$ Médio |
|---------------------|----|--------------|-----------|-------------------|---------|--------------------|
| 4%                  | C1 | 33,59        | 43,11     | 16,40             | Não     | 33,64              |
|                     | C2 | 33,69        |           |                   | Não     |                    |
|                     | C3 | 62,05        |           |                   | Sim     |                    |
| 5%                  | C4 | 99,19        | 95,49     | 20,46             | Não     | 95,49              |
|                     | C5 | 113,84       |           |                   | Não     |                    |
|                     | C6 | 73,43        |           |                   | Não     |                    |
| 6%                  | C7 | 274,72       | 232,27    | 47,77             | Não     | 232,27             |
|                     | C8 | 241,52       |           |                   | Não     |                    |
|                     | C9 | 180,55       |           |                   | Não     |                    |

Fonte: Autor (2025).

Figura 11 - Resultados médios de  $CT_{Index}$  para as misturas de referência em função do teor de asfalto e indicação de utilização do TDOT.



Fonte: Autor (2025).

Analisando-se a Tabela 7 e a Figura 11, percebe-se que os valores de  $CT_{Index}$  apresentaram um comportamento crescente e coerente com o aumento do teor de ligante. A maior quantidade de asfalto representou acréscimos da ordem de 143% a 184% na capacidade de resistência ao trincamento das misturas de referência. Nesse cenário, destaca-se que também há influência do volume de vazios ( $V_v$ ) sobre esses resultados, uma vez que, para maiores teores de asfalto, observa-se menor quantidade de vazios. De acordo com o critério de Zhou *et al.* (2021), as misturas elaboradas com os maiores teores de asfalto (5% e 6%) atendem ao valor mínimo de  $CT_{Index}$  de 90 e, inclusive, poderiam ser indicadas para cenários de tráfego médio a pesado segundo as diretrizes do TDOT (NAPA, 2021).

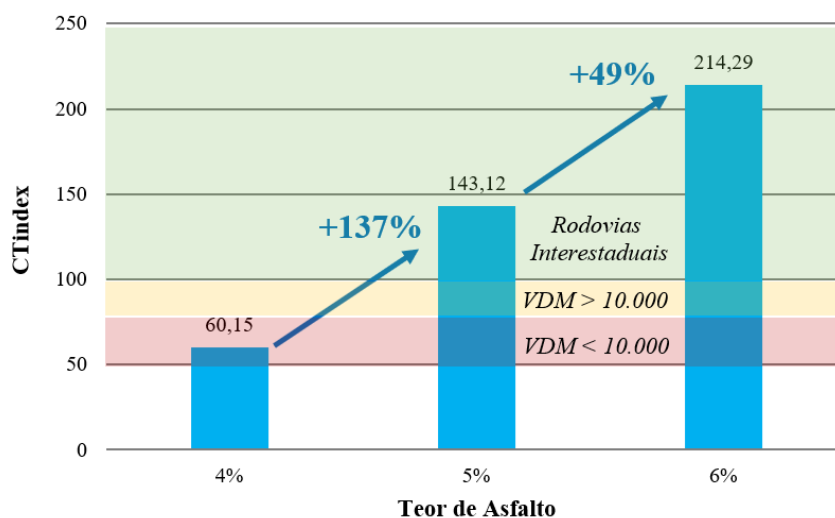
Quanto às misturas elaboradas com a utilização de material fresado, é importante destacar que, em função das tentativas prévias de compactação em laboratório, ajustou-se o alvo de  $V_v$  para 8% ( $\pm 0,5\%$ ) nas misturas com 5% e 6% de ligante e para 9% ( $\pm 0,5\%$ ) na mistura com menor teor de asfalto (4%). Na Tabela 8 são apresentados os resultados de  $CT_{Index}$  para as misturas produzidas com material fresado, em substituição a 15% do peso total da mistura de referência e na Figura 12 são apresentados os valores médios em função dos teores de asfalto.

Tabela 8 - Resultados de  $CT_{Index}$  para as misturas elaboradas com material fresado em função do teor de asfalto.

| Teor<br>de Asfalto<br>(%) | CP  | $CT_{Index}$ | Média  | Desvio<br>Padrão | Outlier | $CT_{Index}$<br>Médio |
|---------------------------|-----|--------------|--------|------------------|---------|-----------------------|
| 4%                        | F9  | 56,26        | 91,80  | 10,45            | Não     | 60,15                 |
|                           | F16 | 71,98        |        |                  | Não     |                       |
|                           | F17 | 52,20        |        |                  | Não     |                       |
|                           | F18 | 186,75       |        |                  | Sim     |                       |
| 5%                        | F22 | 115,55       | 143,12 | 26,59            | Não     | 143,12                |
|                           | F29 | 145,23       |        |                  | Não     |                       |
|                           | F30 | 168,60       |        |                  | Não     |                       |
| 6%                        | F20 | 234,42       | 214,29 | 30,57            | Não     | 214,29                |
|                           | F27 | 179,11       |        |                  | Não     |                       |
|                           | F26 | 229,34       |        |                  | Não     |                       |

Fonte: Autor (2025).

Figura 12 – Resultados médios de  $CT_{Index}$  para as misturas com 15% de RAP em função do teor de asfalto e indicação de utilização do TDOT.



Fonte: Autor (2025).

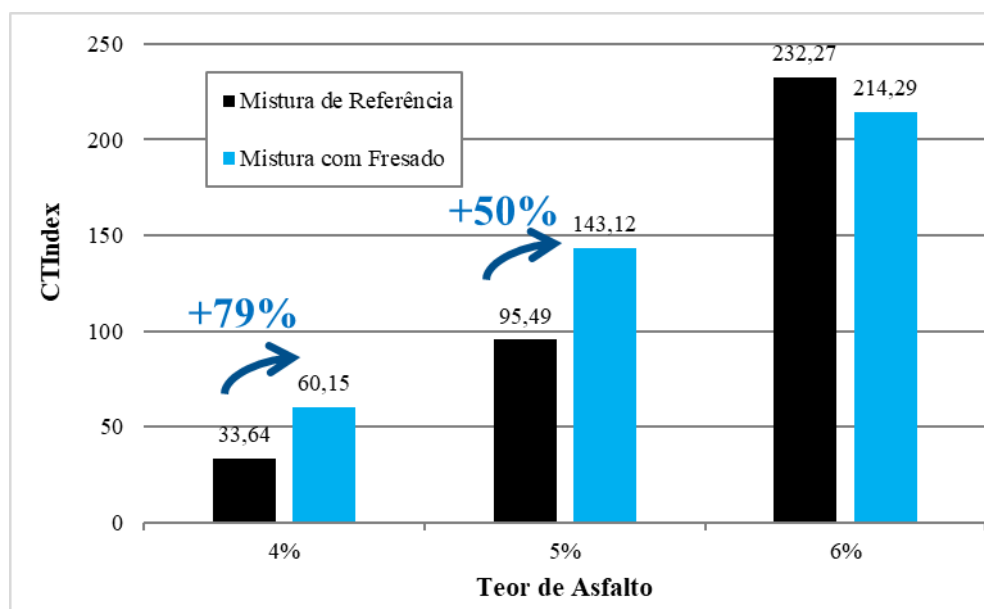
Por meio da Tabela 8 e da Figura 12, verifica-se que a tendência de comportamento das misturas com RAP foi similar à observada para as misturas de referência, nas quais o teor de asfalto exerce influência significativa no comportamento relacionado à redução do potencial de trincamento. Esse efeito representou um aumento de 256% no valor de  $CT_{Index}$  entre o menor e o maior teor de asfalto. Além disso, constata-se que as misturas com 5% e 6% de ligante atendem ao critério de aceitabilidade proposto por Zhou *et al.* (2021), podendo serem indicadas para tráfego pesado de acordo com o critério do TDOT (NAPA, 2021).

Na Figura 12 são apresentados, de maneira comparativa, os resultados de  $CT_{Index}$  para as duas condições de estudo: com e sem a utilização de RAP. Nota-se que as misturas com material fresado apresentaram aumentos expressivo na resistência ao trincamento, principalmente para o teor de 4% de asfalto, seguido pelo teor de 5%. Contudo, para o maior teor de asfalto, o efeito foi contrário e pouco relevante, sendo que a mistura de referência apresentou valor de  $CT_{Index}$  7,7% superior ao da mistura com RAP. Esse comportamento pode ser explicado pelo predomínio da maior quantidade de ligante na estrutura da mistura asfáltica, situação em que quantidades adicionais de asfalto exercem efeito reduzido.

O melhor desempenho das misturas com RAP, em relação às misturas de referência, quanto ao aumento da resistência ao trincamento nos demais teores de asfalto, pode ser justificado pelo fato de o fresado ter sido considerado como “agregado negro”, podendo ter

sofrido mobilização e, consequentemente, aumentado o teor de ligante efetivo nas misturas com 15% de RAP.

Figura 13 - Resultados médios de  $CT_{Index}$  para as misturas sem e com material fresado em função do teor de asfalto.



Fonte: Autor (2025).

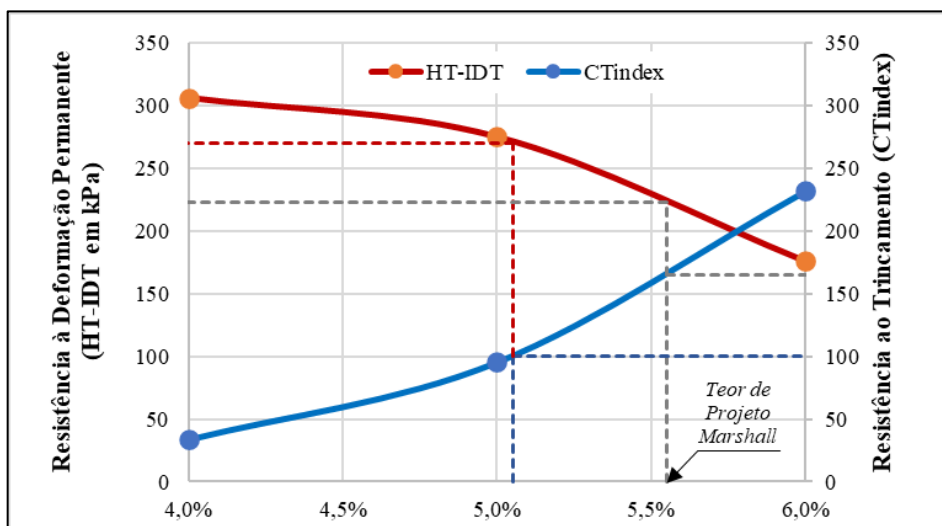
Os efeitos da variação do teor de asfalto para uma mesma distribuição granulométrica e diferentes fontes de agregados, devem envolver uma análise conjunta dos principais fenômenos responsáveis pelos defeitos em pavimentos asfálticos de comportamento flexível: trincamentos por fadiga e afundamentos por deformação permanente.

Para esse tipo de avaliação, são apresentadas as Figuras 14 e 15, que exibem os resultados médios de HT-IDT — interpretados como indicativos da resistência à deformação permanente — e os resultados de  $CT_{Index}$  — relacionados à resistência ao trincamento para os casos das misturas de referência e das misturas com 15% de RAP, respectivamente. Esses resultados são apresentados em função da variação dos teores de asfalto testados e indica o teor de asfalto de projeto determinado pelo método Marshall (5,55%), para o qual podem ser estimados os valores esperados de HT-IDT e  $CT_{Index}$ .

Ainda nessas Figuras é apresentado o valor mínimo de  $CT_{Index}$  que caracteriza a recomendação de uso das misturas asfálticas em condições de tráfego pesado, conforme o TDOT (NAPA, 2021). A partir desse nível de  $CT_{Index}$  ( $\geq 100$ ), é possível determinar o teor

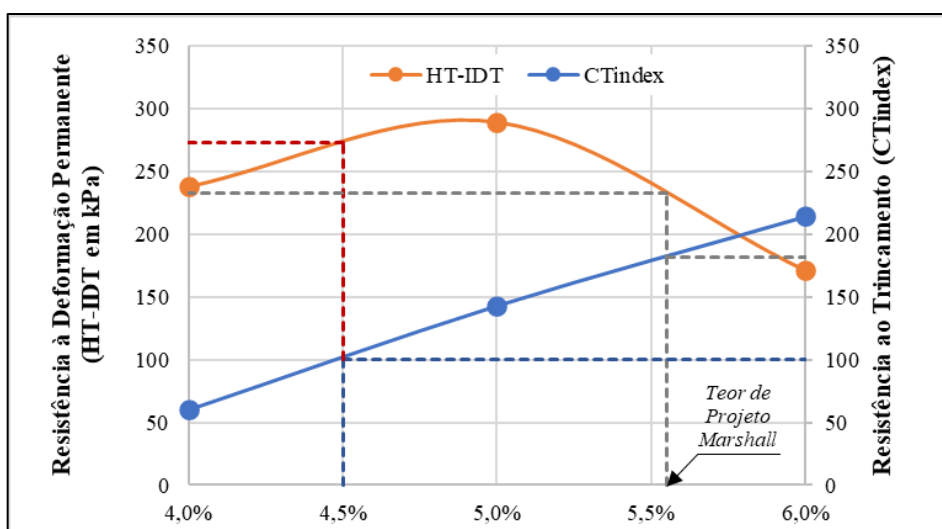
mínimo de asfalto que represente o maior nível de resistência à deformação permanente (HT-IDT).

Figura 14 - Resultados médios de HT-IDT e  $CT_{Index}$  para as misturas de referência em função do teor de asfalto e comindicação do teor de projeto Marshall.



Fonte: Autor (2025).

Figura 15 - Resultados médios de HT-IDT e  $CT_{Index}$  para as misturas com RAP em função do teor de asfalto e comindicação do teor de projeto Marshall.



Fonte: Autor (2025).

Analisando-se as Figuras 14 e 15, evidencia-se o comportamento típico das misturas asfálticas em relação à deformação permanente e ao trincamento por fadiga, em função do teor

de ligante. À medida que se aumenta a quantidade de ligante, observa-se aumento relevante na resistência ao trincamento. Em contrapartida, ocorre redução considerável na resistência à deformação permanente.

Nota-se que o teor de asfalto de projeto, determinado por meio do método Marshall, resulta em uma expectativa de elevada resistência ao trincamento, o que indica a viabilidade técnica de aplicação em condições de tráfego pesado, conforme o critério do TDOT (NAPA, 2021), uma vez que foram obtidos valores de  $CT_{Index}$  superiores a 100 — especificamente, 165 e 182 para os cenários de misturas sem e com utilização de RAP, respectivamente. Esse comportamento pode ser explicado pela possível mobilização do ligante envelhecido presente no RAP resultando numa maior quantidade de asfalto disponível.

Quanto à resistência à deformação permanente, o comportamento das misturas com e sem RAP foi similar para o teor de asfalto de projeto. Nesse teor, a mistura de referência apresentou valor de HT-IDT de 223 kPa, enquanto a mistura com RAP atingiu 233 kPa. Desse modo, a classe de resistência à deformação permanente para ambos os cenários foi “Regular”, o que restringe sua indicação de uso a condições de tráfego médio, conforme Christensen e Bonaquist (2007).

Considerando-se o valor mínimo de  $CT_{Index}$  de 100 para caracterizar a viabilidade de utilização de uma mistura asfáltica em situações de tráfego pesado, identificaram-se os teores mínimos de asfalto de 4,5% e 5,05% para as misturas com e sem RAP, respectivamente. Esses teores mínimos representam o ponto de máxima resistência à deformação permanente possível, sem comprometer a resistência ao trincamento. Verifica-se que a necessidade de ligante é menor no cenário com utilização de RAP, possivelmente em função da mobilização do ligante envelhecido.

Para a condição da mistura de referência, o teor mínimo possível de asfalto (5,05%) resulta em uma expectativa de HT-IDT de 272 kPa, valor superior ao obtido para o teor de projeto Marshall (223 kPa). Assim, observa-se um aumento de 22% na resistência à deformação permanente, sem prejuízo da resistência ao trincamento. Nessa condição, a mistura pode ser classificada como “Boa”, sendo tecnicamente viável sua aplicação em situações de tráfego pesado de acordo com Christensen e Bonaquist (2007).

Comportamento semelhante é observado para a mistura com RAP. O teor mínimo possível de asfalto (4,5%) corresponde a um valor estimado de HT-IDT de 275 kPa, o que representa um aumento de 18% em relação ao valor obtido para o teor de projeto Marshall (233 kPa). Nessa situação, a mistura com fresado também é classificada como “Boa” quanto ao desempenho frente à deformação permanente, sendo adequada para tráfego pesado.

Desta forma, estudos sobre o método de dosagem Marshall (BERNUCCI *et al.*, 2022) indicam que o nível de compactação empregado nesse método tende a resultar em teores de ligante mais elevados. Essa característica pode melhorar o desempenho da mistura à fadiga, devido ao maior conteúdo de asfalto disponível. No entanto, em condições críticas – como tráfego intenso de veículos pesados, temperaturas elevadas e baixas velocidades –, esses teores mais altos podem reduzir a resistência à deformação permanente, comprometendo a durabilidade do pavimento.

Evidencia-se, portanto, a possibilidade de aumentar a resistência das duas misturas estudadas quanto à deformação permanente, sem comprometer o potencial de resistência ao trincamento. A possibilidade de melhoria da resistência à deformação permanente de misturas dosadas pela utilização do método Marshall já foi identificada em outros estudos, como o de Leandro (2016). No entanto, essa abordagem requer a utilização de ensaios mecânicos consolidados e específicos para esse tipo de avaliação. Nesse sentido, as próximas etapas desse trabalho incluem a realização de ensaio uniaxial de carga repetida, ensaio de fadiga em vigotas e o monitoramento e investigação de um trecho experimental.

## 5 CONCLUSÃO

A principal conclusão deste trabalho é que a utilização de RAP, em substituição parcial da fração graúda do agregado basáltico (15% de RAP na massa total da mistura), mostrou-se tecnicamente viável. As misturas com RAP apresentaram desempenho equivalente — e, em alguns casos, superior — ao das misturas de referência, especialmente em relação ao potencial de trincamento, possivelmente em razão da mobilização do ligante envelhecido presente no fresado. Ainda assim, observou-se que a resistência à deformação permanente dessas misturas deve ser cuidadosamente avaliada, uma vez que o aumento do teor de ligante efetivo pode comprometer o desempenho sob cargas repetidas.

Complementarmente, conclui-se que o teor de asfalto influencia de maneira expressiva o comportamento mecânico das misturas, reforçando a importância de um processo de dosagem equilibrado — sobretudo nos casos que envolvem o uso de RAP na produção de novas misturas asfálticas.

O teor de ligante de projeto (5,5% de CAP), determinado pela utilização do método Marshall, apresentou resultados satisfatórios quanto à resistência ao trincamento, mas não correspondeu ao melhor desempenho em termos de resistência à deformação permanente. A análise do comportamento mecânico com base em teores mínimos de ligante que atendam aos critérios de resistência ao trincamento para tráfego pesado demonstrou ser possível otimizar o teor de ligante das misturas. Tal otimização pode resultar em ganhos significativos de resistência à deformação permanente, sem comprometer o desempenho frente ao trincamento, sendo viável tanto para misturas com RAP quanto para aquelas compostas apenas por agregados convencionais. Essa constatação mostra uma possível limitação do método tradicional de dosagem para atender às exigências de tráfego mais severas, especialmente em regiões com clima quente, tráfego pesado e velocidades reduzidas.

Por fim, os resultados reforçam a necessidade de adoção de metodologias de dosagem mais balanceadas, que considerem simultaneamente os principais mecanismos de degradação dos pavimentos asfálticos e as condições específicas de aplicação da mistura, tais como: posição na estrutura do pavimento, tipo de estrutura, volume e tipo de tráfego, relevo e clima da região. A aplicação de ensaios mecânicos consolidados torna-se essencial para esse tipo de avaliação. No entanto, vislumbra-se grande potencial na utilização dos ensaios HT-IDT e IDEAL CT, em



suas versões modificadas, como ferramentas complementares em processos de dosagem atualmente baseados apenas em critérios volumétricos — especialmente em obras com menor nível de investimento ou com acesso limitado a ensaios laboratoriais mais sofisticados.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 11341: Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland.** Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT. **NBR 12052: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e da massa unitária.** Rio de Janeiro, 2017.
- ABNT. **NBR 15086: Materiais betuminosos - Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro de cimentos asfálticos modificados por polímeros elastoméricos ou borracha.** Rio de Janeiro, 2022.
- ABNT. **NBR 15166: Asfalto modificado - Ensaio de separação de fase.** Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT. **NBR 15184: Materiais betuminosos — Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional.** Rio de Janeiro, 2021.
- ABNT. **NBR 6296: Produtos betuminosos semissólidos — Determinação da massa específica e densidade relativa.** Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT. **NBR 6560: Ligantes asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola.** Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT. **NBR 6576: Materiais asfálticos - Determinação da penetração.** Rio de Janeiro, 2007.
- ABNT. **NBR 7809: Agregados graúdos – Determinação do índice de forma – Método visual.** Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT. **NBR NM 51: Agregados – Determinação da abrasão Los Angeles.** Rio de Janeiro, 2001.
- ASTM INTERNATIONAL. **Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature.** ASTM D8225-19, 2019.
- ASTM INTERNATIONAL. **Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.** ASTM C88, 2018.
- BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2022.
- BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos.** 3. ed. rev. e atual. São Paulo: Exceção Editorial, 2010.
- BOZ, I. et al. **Interlaboratory study for the indirect tensile at high temperature test and ideal rutting test.** Charlottesville, VA: Virginia Transportation Research Council, 2025. (Final Report VTRC 25-R14).

BOZ, I. et al. **Simple and practical tests for rutting evaluation of asphalt mixtures in the balanced mix design process**. Charlottesville, VA: Virginia Transportation Research Council, 2023. (Final Report VTRC 23-R11).

CENTOFANTE, R. **Estudo laboratorial da utilização de material fresado em misturas asfálticas recicladas a quente**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, RS, 2016.

Christensen, D., and Bonaquist, R. **Practical Approaches to Hot-Mix Asphalt Mix Design and Production Quality Control Testing**. In **Transportation Research Circular E-C124: Using the Indirect Tensile Test to Evaluate Rut Resistance in Developing Hot-Mix Asphalt Designs**. Transportation Research Board, Washington, DC, 2007, pp. 62-77.

DAVANZO LOPES, A. F. et al. Geração e utilização do RAP no Brasil. **Revista ENINFRA**, v. 3, n. 3, p. 201–217, 26 nov. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **Misturas betuminosas - Determinação do teor de betume**. Norma DNER-ME 053/94. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Pavimentação - Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio**. Norma DNIT 412/2019 - ME. Brasília, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Pavimentação asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall**. Norma DNIT 178/2018 - PRO. Brasília, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de ensaio**. Norma DNIT 427/2020 - ME. Brasília, 2020.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Resolução nº 14, de 8 de julho de 2021. Instrução normativa nº 35 DNIT/Sede. **Diário Oficial da União: seção 1**, Brasília, DF, nº 129, p. 53, 12 jul. 2021.

LEANDRO, R. P. **Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

LEANDRO, Rodrigo; SANTANA, Andher Paulo Capanema. Aplicação do ensaio IDEAL-CT para avaliação da resistência à fadiga de misturas asfálticas densas. In: REUNIÃO ANUAL DE

PAVIMENTAÇÃO – RAPv, 49., 2024. **Anais [...]**. [S.l.: s.n.], 2024. DOI: 10.29327/1430212.49-19.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION - NAPA. **Balanced mix design resource guide**. Greenbelt, MD: National Center for Asphalt Technology, 2021. (Report No. IS-143).

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION - NAPA. **The carbon footprint of asphalt pavements: A reference document for decarbonization**. Greenbelt, MD: NAPA, 2024.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (NAPA) e FEDERAL HIGHWAYS ADMINISTRATION (FHWA). **HMA Pavement mix type selection guide**. 2001.

SANTOS, M. A. Z. **Análise do efeito da adição de fibra de polipropileno no comportamento mecânico de uma brita graduada tratada com cimento**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.1288>. Acesso em: 20 jan. 2025.

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

WEST, R.; WILLIS, J. R.; MARASTEANU, M. **Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content**. Auburn, AL: NCHRP, 2013. (Project Number 09-46, Report 752).

WILLIAMS, B. W.; WILLIS, J. R.; SHACAT, J. **Annual asphalt pavement industry survey on recycled materials and warm-mix asphalt usage: 2021**. 12th ed. Greenbelt, MD: National Asphalt Pavement Association, 2022. (Report IS-138).

YIN, F.; WEST, R. C. **Balanced mix design resource guide**. Greenbelt, MD: National Asphalt Pavement Association, 2021. (No. IS-143).

ZHOU, F. **Development of an IDEAL cracking test for asphalt mix design, quality control and quality assurance**. Washington, DC: Transportation Research Board, 2019. (NCHRP IDEA Program Final Report, Project 195).

ZHOU, F.; STEGER, R.; MOGAWER, W. **Development of a coherent framework for balanced mix design and production quality control and quality acceptance**. *Construction and Building Materials*, v. 287, 123020, 2021.