

# INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE DO LIGANTE ASFÁLTICO NAS PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS E MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

## INFLUENCE OF ASPHALT BINDER VISCOSITY ON THE VOLUMETRIC AND MECHANICAL PROPERTIES OF DENSE ASPHALT MIXTURES

RAFAEL CORREIA ALMEIDA **ANDRADE**<sup>1</sup>, DANIELLE SUEMI **NARIMATSU**<sup>2</sup>, AMANDA PEREIRA **MARGATO**<sup>3</sup>, JESNER SERENI **ILDEFONSO**<sup>4\*</sup>

1. Acadêmico do curso de graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá; 2. Mestranda em Engenharia Urbana, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá. 3. Mestranda em Engenharia Urbana, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá. 4. Professor do Departamento de Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá.

\* Av. Colombo, 5790, Bloco C67, Sala 204, Zona 7, Maringá, Paraná, Brasil. CEP 87020-900, [jsildefonso@uem.br](mailto:jsildefonso@uem.br)

Recebido em 13/11/2025. Aceito para publicação em 02/12/2025

### RESUMO

Os revestimentos asfálticos desempenham papel fundamental na durabilidade e no desempenho funcional dos pavimentos, resistindo de forma contínua às solicitações de tráfego e às variações climáticas ao longo de sua vida útil. A viscosidade do ligante asfáltico constitui um fator determinante para a qualidade da mistura e influencia diretamente suas propriedades volumétricas e mecânicas. Variações inadequadas nesse parâmetro favorecem o surgimento de defeitos prematuros, como trilhas de roda, exsudação e fissuração, os quais inicialmente reduzem a funcionalidade da superfície de rolamento e podem evoluir para falhas estruturais mais graves. Para investigar esses efeitos, o estudo realizou a confecção de corpos de prova com agregado basáltico britado e ligante CAP 50/70, em diferentes faixas de viscosidade durante a compactação. Os resultados demonstram que o controle rigoroso da viscosidade é determinante para a obtenção de revestimentos de qualidade, promovendo maior durabilidade e reduzindo a incidência de defeitos que comprometem a vida útil do pavimento. O estudo fornece dados relevantes sobre a influência da viscosidade nas propriedades das misturas asfálticas, ampliando o conhecimento científico sobre o comportamento desses materiais e o papel da viscosidade no desempenho das estruturas viárias.

**PALAVRAS-CHAVE:** Mistura asfáltica; Módulo de resiliência; Resistência à tração; Volume de vazios.

### ABSTRACT

Asphalt pavements play a fundamental role in the durability and functional performance of road surfaces, continuously withstanding traffic loads and climatic variations throughout their service life. The viscosity of the asphalt binder is a key factor in mixture quality and directly influences its volumetric and mechanical properties. Inadequate variations in this parameter promote the emergence of premature distresses, such as rutting, bleeding, and cracking, which

initially reduce the functionality of the riding surface and may progress to more severe structural failures. To investigate these effects, this study produced specimens using crushed basalt aggregate and CAP 50/70 binder, across different viscosity ranges during compaction. The results demonstrate that strict control of binder viscosity is critical for achieving high-quality pavements, enhancing durability, and reducing the occurrence of distresses that compromise pavement service life. This study provides relevant data on the influence of viscosity on the properties of asphalt mixtures, expanding scientific understanding of material behavior and the role of viscosity in the performance of pavement structures.

**KEYWORDS:** Hot mix asphalt; Resilient modulus; Indirect tensile strength; Air voids

### 1. INTRODUÇÃO

O sistema viário desempenha um papel essencial no desenvolvimento socioeconômico de um país, ao possibilitar o transporte de pessoas e mercadorias e promover a integração entre diferentes regiões. Com a expansão urbana e o aumento da demanda por transporte, torna-se necessário dispor de uma infraestrutura que combine eficiência e sustentabilidade. Nesse contexto, o desempenho das vias depende da qualidade do pavimento, que influencia diretamente sua funcionalidade e durabilidade<sup>1</sup>.

Entre os diversos fatores que afetam o desempenho do pavimento, destacam-se as propriedades do ligante asfáltico, especialmente a viscosidade, que interfere nas características volumétricas e mecânicas das misturas asfálticas densas. Essas propriedades influenciam diretamente a resistência do pavimento, a deformação permanente e a vida útil da via<sup>2</sup>.

O ligante asfáltico, também conhecido como cimento asfáltico de petróleo (CAP), é um material

termoviscoplastico cujas propriedades reológicas variam conforme a temperatura. Em baixas temperaturas, o CAP tende a comportar-se como um material semissólido, apresentando maior rigidez. À temperatura ambiente, exibe comportamento viscoelástico, combinando características de materiais viscosos e elásticos. Quando aquecido, o CAP torna-se progressivamente mais líquido, facilitando sua aplicação em pavimentação<sup>3</sup>.

Essa variação de comportamento está diretamente relacionada à mobilidade molecular do material. Em temperaturas muito baixas, as moléculas do ligante perdem a capacidade de se movimentar entre si, resultando em uma viscosidade extremamente elevada e fazendo com que o material se comporte quase como um sólido elástico. À medida que a temperatura aumenta, as moléculas ganham mobilidade, permitindo um fluxo mais eficiente entre elas. Esse aumento na movimentação molecular reduz a viscosidade e, em temperaturas mais altas, o ligante passa a apresentar um comportamento mais próximo ao de um líquido viscoso<sup>4</sup>.

Essa relação entre temperatura e viscosidade exerce influência decisiva sobre o processo de compactação das misturas asfálticas densas. Nesse contexto, Androjić e Dimter (2015)<sup>5</sup> sugerem que a faixa ideal para a temperatura de compactação situa-se entre 120 °C e 170 °C, uma vez que temperaturas excessivamente altas ou baixas são comumente associadas à rejeição de cargas de mistura asfáltica. Considerando que a viscosidade do ligante asfáltico é fortemente dependente da temperatura, essas faixas correspondem a níveis de viscosidade que favorecem a trabalhabilidade do material e a adequada distribuição do ligante entre os agregados.

Além disso, a National Asphalt Pavement Association (NAPA, 2002)<sup>6</sup> recomenda que, no processo de dosagem pelo método Marshall, o teor ótimo de ligante de misturas asfálticas densas seja definido de modo a atingir um volume de vazios (Vv) de aproximadamente 4%. Esse valor é considerado ideal por proporcionar um equilíbrio adequado entre resistência mecânica e durabilidade, evitando tanto a deformação plástica quanto a oxidação prematura da mistura.

A compactação das misturas asfálticas deve ser executada de forma criteriosa para o desempenho satisfatório dos pavimentos. Segundo o Asphalt Institute (1989)<sup>7</sup>, a compactação adequada proporciona três benefícios principais: (1) aumento do contato entre os agregados, promovendo maior fricção interna e, consequentemente, uma mistura mais estável; (2) redução do volume de vazios (Vv), resultando em um pavimento quase impermeável, o que diminui a penetração de água e ar, aumentando a resistência ao envelhecimento por oxidação e protegendo a base; (3) prevenção de deformações permanentes, uma vez que pavimentos pouco compactados tendem a sofrer pós-compactação sob o tráfego, especialmente nas trilhas de roda.

De forma complementar, observa-se que a eficiência da compactação em campo depende de diversas variáveis, como a capacidade de suporte da base, a temperatura do ar, a umidade ambiente, o nível de radiação solar, a espessura da camada asfáltica e, também, a temperatura inicial da mistura asfáltica no momento da compactação<sup>8</sup>. Esses fatores devem ser cuidadosamente controlados para garantir a qualidade e a durabilidade do pavimento.

Em condições reais de obra, variações na temperatura do material durante o transporte, a distribuição e o tempo necessário para iniciar a compactação podem alterar significativamente o estado reológico do ligante. Essas flutuações influenciam diretamente a eficiência da compactação, gerando trechos com densidades diferentes ao longo da pista e favorecendo o surgimento de defeitos prematuros. A sensibilidade das misturas asfálticas a essas oscilações térmicas torna o controle da viscosidade um elemento crítico para garantir uniformidade e desempenho, o que reforça a necessidade de compreender seus efeitos sobre a estrutura interna da mistura.

Embora a influência da temperatura de compactação seja amplamente mencionada na literatura, ainda são limitados os estudos que analisam de forma integrada o impacto da viscosidade sobre os parâmetros volumétricos e mecânicos em um mesmo arranjo experimental com os materiais disponíveis na região de Maringá. Essa ausência dificulta a compreensão completa da relação entre trabalhabilidade, densificação obtida e comportamento estrutural imediato da mistura. Avaliar simultaneamente esses aspectos permite identificar com maior precisão os limites operacionais nos quais a compactação permanece eficiente, bem como os pontos em que a estrutura da mistura passa a responder de maneira distinta.

Portanto, o controle rigoroso da viscosidade do ligante no momento da compactação é essencial para alcançar a densidade e a uniformidade desejadas, influenciando diretamente a resistência, a estabilidade e a vida útil do pavimento. Ao mesmo tempo, é necessário evitar viscosidades muito baixas decorrentes de temperaturas excessivas, que podem acelerar a oxidação do CAP, provocando endurecimento e aumento da suscetibilidade a fissuras<sup>9,10</sup>.

Estudos evidenciam que a viscosidade ótima do ligante asfáltico é determinante para a adequada distribuição dos agregados, promovendo a densificação da mistura e aprimorando parâmetros como a estabilidade Marshall, o módulo de resiliência e a rigidez<sup>11,12</sup>. Desvios dessa faixa de viscosidade, tanto por elevação quanto por redução, prejudicam a compactação da mistura, afetando a adesividade entre o ligante e os agregados, além de aumentar o volume de vazios no agregado mineral, comprometendo assim a durabilidade e a resistência estrutural do pavimento.<sup>13,14</sup>

Além da relevância técnica, este estudo contribui para a promoção de práticas mais sustentáveis na construção e manutenção de pavimentos, alinhando-se

a determinados Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas. Em especial:

- ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis: A pesquisa apoia a melhoria da qualidade dos pavimentos, garantindo vias seguras, funcionais e adequadas para a mobilidade urbana e rural. Pavimentos duráveis diminuem a necessidade de manutenções frequentes, aumentando a resiliência das cidades.
- ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis: A manutenção da viscosidade ideal durante a compactação promove o uso racional de recursos materiais e energéticos, evitando desperdícios e reparos desnecessários, contribuindo para práticas construtivas mais sustentáveis.

O controle da viscosidade do ligante, aliado à gestão adequada da temperatura de compactação, revela-se essencial para a produção de misturas asfálticas densas de alta qualidade, duráveis e sustentáveis. Para a condução do estudo, foram confeccionados corpos de prova em laboratório utilizando agregado basáltico britado e ligante CAP 50/70, submetidos a diferentes faixas de viscosidade durante a compactação. As análises abrangeram o volume de vazios, a relação betume-vazios, o módulo de resiliência e a resistência à tração, permitindo investigar de forma controlada como a variação da viscosidade influencia o desempenho da mistura.

A seleção dos parâmetros analisados neste estudo busca refletir diretamente os mecanismos internos que governam o desempenho de misturas asfálticas densas. Os parâmetros volumétricos, como o volume de vazios e a relação betume-vazios, fornecem indicadores essenciais da eficiência da compactação e da distribuição do ligante no esqueleto mineral. Já o módulo de resiliência e a resistência à tração permitem avaliar a rigidez recuperável e a integridade do material, elementos fundamentais para compreender como a viscosidade durante a compactação influencia o comportamento mecânico imediato. A análise conjunta dessas respostas possibilita uma visão abrangente da influência reológica do ligante no desempenho inicial das misturas.

Esta pesquisa parte da hipótese de que a viscosidade do ligante durante a compactação exerce influência significativa sobre as propriedades volumétricas e mecânicas das misturas asfálticas densas. A investigação justifica-se pela necessidade de compreender os efeitos da viscosidade em condições de compactação próximas às observadas em pavimentação real, oferecendo subsídios para práticas que reflitam os desafios enfrentados em operações viárias cotidianas e favorecendo a aplicação de procedimentos mais adequados e consistentes com as condições de campo. Assim, esse estudo busca avaliar o impacto de diferentes faixas de viscosidade do ligante sobre essas propriedades, contribuindo para a melhoria do desempenho, durabilidade e confiabilidade de

pavimentos asfálticos.

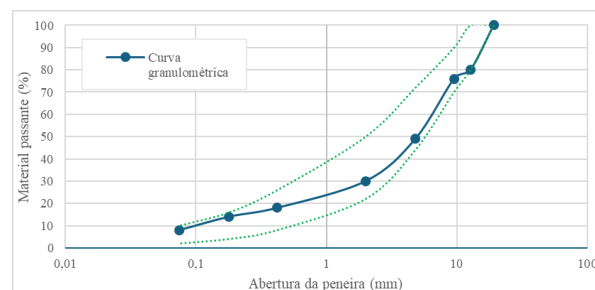
## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa experimental foi iniciada com a caracterização dos agregados e do ligante asfáltico. De posse desses resultados, traçou-se a curva granulométrica dos agregados para posterior determinação do teor de asfalto de projeto. Os corpos de prova foram confeccionados utilizando o referido teor de asfalto como parâmetro de referência.

### 2.1. Agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa são de natureza basáltica da região de Maringá/PR. Para a determinação da densidade do agregado gráudo foi utilizado o método de ensaio DNER-ME 081/98<sup>15</sup>. A densidade relativa real encontrada para a brita gráuda foi de 2,768 g/cm<sup>3</sup> e de 2,765 g/cm<sup>3</sup> para o pedrisco, com absorção de 2,9% e 3,1%, respectivamente. Já, para a determinação da densidade do agregado miúdo (pó de pedra) foi utilizado o método de ensaio DNER-ME 084/95<sup>16</sup>, no qual obteve-se o resultado de 3,042 g/cm<sup>3</sup>.

O material pétreo permaneceu em secagem (105 °C a 110 °C) em estufa por 12 horas, em que se identificou a constância de massa. Posteriormente foi realizada a separação por meio do peneiramento manual, de modo a se obter a proporção de porcentagens de 42% de pó de pedra, 33% de pedrisco e 25% de agregado gráudo, o que resultou em uma curva granulométrica (Figura 1) que se enquadrou na faixa granulométrica C da especificação de serviço DNIT 031/2024 – ES<sup>17</sup>.



**Figura 1.** Composição granulométrica da mistura. **Fonte:** os Autores.

A análise da Figura 1 evidencia que a curva granulométrica apresenta distribuição contínua e bem graduada dentro da Faixa C estabelecida pela DNIT 031/2024<sup>17</sup>, sem indícios de descontinuidades ou concentrações excessivas em faixas específicas de peneiramento. Esse comportamento é compatível com misturas densas destinadas à pavimentação asfáltica, favorecendo a formação de um esqueleto mineral estável e com potencial para atingir níveis adequados de compactação e redução de vazios. A conformidade da curva com a especificação normativa assegura que a estrutura granulométrica não introduz variáveis adicionais ao estudo, permitindo que a análise se concentre de forma isolada nos efeitos decorrentes da variação da viscosidade durante a compactação.

## 2.2. Ligante asfáltico

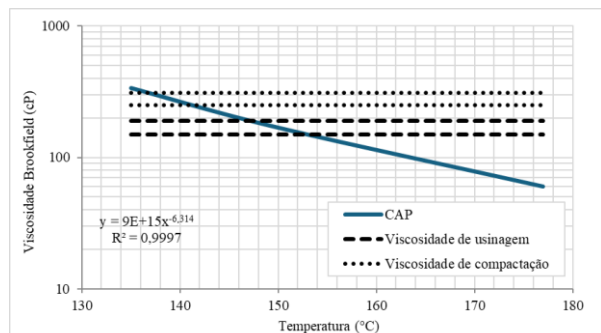
O ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70 convencional, o qual foi submetido ao ensaio de viscosidade Brookfield de acordo com a norma NBR 15184 (2021)<sup>18</sup>. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Caracterização do ligante asfáltico.

Ensaio	Resultado	Especificação
135 °C, SP 21, 20 rpm	336	≥ 274
150 °C, SP 21, 20 rpm	169	≥ 112
177 °C, SP 21, 20 rpm	61	57 - 285

Fonte: os Autores.

Os valores obtidos são coerentes com os limites definidos pela Resolução n° 897 da Agência Nacional do Petróleo (2022)<sup>19</sup>. Em posse dos valores de viscosidade obtidos por meio do viscosímetro Brookfield, foi elaborado o gráfico de viscosidade versus temperatura (Figura 2).



**Figura 2.** Gráfico de viscosidade versus temperatura. Fonte: os Autores.

Considerando-se os centros dos intervalos de usinagem (mistura) e de compactação como referência, adotou-se para essa pesquisa as viscosidades de 157 cP e 265 cP, para mistura e compactação, respectivamente.

O ligante asfáltico foi submetido aos ensaios normativos de penetração, ponto de amolecimento e ponto de fulgor. A penetração, determinada segundo a NBR 6576<sup>20</sup>, apresentou valor de 57 (0,1 mm), situando-se dentro da faixa especificada para CAP 50/70. O ponto de amolecimento, obtido conforme a NBR 6560<sup>21</sup>, foi de 51,8 °C, superior ao limite mínimo de 46 °C. O ponto de fulgor, determinado pela NBR 11341<sup>22</sup>, atingiu 270 °C, excedendo o requisito mínimo de 235 °C. Os resultados confirmam que o material atende integralmente às exigências para ligantes classificados como 50/70.

## 2.3. Método Marshall

A dosagem da mistura, com o uso do método Marshall, foi realizada com base no ensaio DNIT 178/2018 – PRO<sup>23</sup>, com vistas à determinação do teor de projeto do ligante asfáltico. Após a determinação das massas específicas reais dos agregados e do CAP, a curva granulométrica foi definida de acordo com a porcentagem-alvo dentro da faixa especificada.

As temperaturas de mistura e compactação foram estabelecidas com base na curva viscosidade-

temperatura do ligante escolhido. Para a mistura, a viscosidade do ligante deve estar entre 75 e 150 sSF, correspondendo a uma temperatura entre 107 °C e 177 °C. A temperatura dos agregados deve ser 10 °C a 15 °C superior à definida para o ligante, sem ultrapassar 177 °C. Durante a compactação, a viscosidade do ligante deve estar entre 125 e 155 sSF, sendo então necessário definir uma temperatura de compactação correspondente a esse intervalo.

Com o teor de asfalto definido para o estudo, procede-se à moldagem do primeiro grupo, composto por, no mínimo, três corpos de prova (CPs). Os grupos subsequentes são confeccionados com variações no teor de asfalto entre ±0,5% e ±1,0% em relação ao teor principal, até a obtenção de um total de cinco grupos.

Após o resfriamento, os corpos de prova são desmoldados e submetidos à medição de diâmetro e altura em quatro posições distintas para cada. Em seguida, determina-se a massa ao ar e a massa imersa em água de cada grupo, possibilitando o cálculo da densidade aparente pela Equação 1.

$$Dap = \frac{Mar}{Mar - Mi} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que: Dap = densidade aparente; Mar = massa do CP ao ar; Mi = massa do CP imerso.

Ajusta-se o percentual de massa de cada agregado conforme citado anteriormente e obtêm-se a densidade máxima teórica (DMT) correspondente, dada pela Equação 2.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{Ga} + \frac{\%ag}{Gag} + \frac{\%am}{Gam} + \frac{\%f}{Gf}} \quad \text{Eq. 2}$$

Em que: DMT = densidade máxima teórica; %a = porcentagem de asfalto; %ag = porcentagem de agregado graúdo; %am = porcentagem de agregado miúdo; %f = porcentagem de filler; Ga = densidade real do asfalto; Gag = densidade real do agregado graúdo; Gam = densidade real do agregado miúdo; Gf = densidade real do filler.

De acordo com a norma DNIT 031/2024 – ES<sup>17</sup>, o volume de vazios para misturas asfálticas densas deve estar entre 3% e 5%, e seu cálculo é realizado por meio da Equação 3.

$$Vv = \left( \frac{DMT - Dap}{DMT} \right) \times 100 \quad \text{Eq. 3}$$

Em que: Vv = volume de vazios (%); DMT = densidade máxima teórica; Dap = densidade aparente.

A relação betume-vazios é calculada por meio da Equação 4.

$$RBV = \frac{Va}{Va + Vv} \quad \text{Eq. 4}$$

Em que: RBV = relação betume-vazios (%); Va = volume de asfalto (%); Vv = Volume de vazios (%).



Definidas as características volumétricas, os CPs são submersos em banho-maria de 30 a 40 minutos e colocados na prensa Marshall dentro do molde de compressão para determinação da Estabilidade e da Fluência Marshall. Após todos os parâmetros determinados, usa-se as curvas gráficas geradas em função do teor de asfalto e determina-se o teor conforme os requisitos do DNIT 031/2024 – ES<sup>17</sup>.

## 2.4. Preparação dos corpos de prova para determinação da influência da viscosidade do ligante asfáltico

Foram confeccionados 25 corpos de prova para esta pesquisa por meio do método de compactação Marshall (DNIT 178/2018 – PRO<sup>23</sup>). Esses corpos de prova foram distribuídos em cinco grupos experimentais, denominados V1, V2, V3, V4 e V5, correspondentes a diferentes níveis relativos de viscosidade do ligante asfáltico durante a compactação.

As variações de viscosidade foram obtidas indiretamente, mediante o controle da temperatura de compactação, a qual modificou o comportamento reológico do ligante. Dessa forma, os grupos abrangem condições desde a maior viscosidade (em torno de 545 cP) até a menor viscosidade (cerca de 130 cP), sendo o grupo V3 adotado como condição de referência, com viscosidade média aproximada de 265 cP.

A temperatura de mistura foi mantida constante para todos os corpos de prova. Para adequar às temperaturas de compactação, os corpos de prova permaneceram em estufa por 2 horas, antes de serem compactados, de forma a simular os tempos de transporte, distribuição e compactação em campo.

As temperaturas correspondentes às condições utilizadas para o controle dos níveis de viscosidade encontram-se apresentadas na Tabela 2, as quais são indicadas apenas como referência operacional.

**Tabela 2.** Temperatura da estufa para cada cenário.

Grupo	Descrição	Temperatura na estufa (°C)
V1	Alta viscosidade	125
V2	Média-alta viscosidade	132
V3	Viscosidade de Referência	139
V4	Média-baixa viscosidade	146
V5	Baixa viscosidade	153

Fonte: os Autores.

De forma geral, as faixas de viscosidade dos grupos variaram de valores superiores à condição de referência (V1 e V2) até valores progressivamente inferiores (V4 e V5), refletindo uma redução gradativa da resistência ao escoamento do ligante.

Instantes antes da compactação Marshall, após a retirada da mistura asfáltica da estufa, foi realizada uma rápida homogeneização com o auxílio de uma espátula. Em seguida, verificou-se a condição de viscosidade (V, em cP) do ligante de cada corpo de prova (CP), cujos valores estão apresentados na Tabela

3. Após essa etapa, deu-se continuidade ao processo de compactação Marshall.

**Tabela 3.** Viscosidade do ligante asfáltico no momento da compactação Marshall.

CP	V (cP)	CP	V (cP)	CP	V (cP)	CP	V (cP)	CP	V (cP)
1	518	6	350	11	242	16	265	21	139
2	518	7	334	12	265	17	194	22	139
3	545	8	367	13	334	18	222	23	133
4	877	9	350	14	290	19	212	24	139
5	707	10	367	15	253	20	222	25	157

Fonte: os Autores.

Após 24 horas da compactação, os corpos de prova foram removidos dos moldes. Em seguida, foram realizadas as medições de massa ao ar, massa imersa em água e dimensões geométricas para calcular o volume de vazios e a relação betume-vazios. Após essas etapas, os corpos de prova foram acondicionados em uma sala climatizada a 25 °C por mais 24 horas, antes dos ensaios mecânicos.

As condições de viscosidade associadas aos corpos de prova 4 e 5 apresentaram valores superiores ao intervalo considerado ideal para o grupo de maior viscosidade (V1), refletindo uma trabalhabilidade reduzida e uma possível dificuldade de acomodação do ligante entre os agregados. Em conformidade com a recomendação de Androjić e Dimter (2015)<sup>5</sup>, que estabelecem a temperatura mínima de compactação em 120 °C para garantir uma adequada relação betume-vazios, optou-se por analisar separadamente o comportamento desses dois corpos de prova em relação aos demais. Essa decisão visou manter a coerência entre os resultados obtidos e as condições reológicas ideais preconizadas para o processo de compactação.

## 2.5. Ensaios de caracterização mecânica

Para a caracterização do comportamento mecânico da mistura asfáltica, foram realizados os ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração. Esses ensaios visam compreender tanto a rigidez da mistura quanto sua resistência máxima à tração no momento da ruptura.

### 2.5.1. ENSAIO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O módulo de resiliência das misturas foi determinado por meio do método de ensaio contido em DNIT 135/2018 – ME<sup>24</sup>. Para a preparação do ensaio, foram realizadas quatro medições da altura e do diâmetro de cada corpo de prova, sendo posteriormente calculada a média de cada dimensão. Em seguida, os corpos de prova foram armazenados em sala climatizada a 25 °C por um período de 24 horas, a fim de permitir a estabilização térmica. Concluído esse período, os corpos de prova foram individualmente posicionados na aparelhagem destinada à realização dos ensaios.

O ensaio foi realizado com aplicação de golpes na frequência de 1 Hz, com 0,1 segundo de aplicação de

carga e 0,9 segundo de recuperação, no plano diametral vertical do corpo de prova. A carga foi determinada para gerar deslocamentos entre 0,020 mm e 0,030 mm. O módulo de resiliência é uma relação entre tensão e energia recuperável, multiplicado por uma constante e dado pela Equação 5

$$MR = \frac{\sigma}{\epsilon_{rec}} \cdot c \quad \text{Eq. 5}$$

Em que: MR = Módulo de resiliência (MPa);  $\sigma$  = Tensão aplicada (N);  $\epsilon_{rec}$  = Deformação recuperável; c = Constante.

Após a realização do ensaio, os sete primeiros pulsos de cada leitura foram desconsiderados, tendo em vista que, nesse intervalo, o corpo de prova ainda se encontrava em processo de acomodação. Com isso em vista, foi calculada a média dos pulsos remanescentes para cada corpo de prova.

### 2.5.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A execução do ensaio de resistência à tração por compressão diametral seguiu o procedimento estabelecido na especificação DNIT 136/2018 – ME<sup>25</sup>. Para tanto, utilizou-se os mesmos 25 corpos de prova previamente ensaiados no módulo de resiliência, visto que esse ensaio não é destrutivo. Os corpos de prova permaneceram em sala climatizada a 25 °C, o que assegurou a realização dos ensaios sob condições térmicas uniformes.

Durante o ensaio, cada corpo de prova foi posicionado horizontalmente em uma prensa e submetido a uma carga monotônica aplicada ao longo do diâmetro, com velocidade de 0,8 mm/s, até a ocorrência da ruptura. A carga máxima registrada no momento da ruptura foi utilizada para o cálculo da resistência à tração, conforme expressa a Equação 6.

$$RT = \frac{2F}{\pi DH} \quad \text{Eq. 6}$$

Em que: RT = Resistência à tração (MPa); F = Carga de ruptura (N); D = Diâmetro do corpo de prova (mm); H = Altura do corpo de prova (mm).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram divididos em parâmetros volumétricos, que incluem o volume de vazios e a relação betume-vazios, e em parâmetros mecânicos, compostos pelo módulo de resiliência e pela resistência à tração. Ressalta-se a análise separada dos corpos de prova 4 e 5, uma vez que apresentaram temperaturas de compactação inferiores a 120 °C, resultando em viscosidades abaixo do intervalo adequado.

### 3.1. Dosagem Marshall

Os resultados da dosagem do teor de asfalto de projeto pelo Método Marshall encontram-se na Tabela 4. O teor de asfalto de projeto foi determinado em 5,1%, de forma atender os 4% de Vv e se enquadrar nos demais intervalos constantes na especificação de

serviço DNIT 031/2024 – ES<sup>17</sup>. Para o teor de projeto, a mistura asfáltica apresentou Estabilidade Marshall de 1394 kgf e Fluência Marshall de 3,87 mm.

**Tabela 4.** Resultados da dosagem Marshall.

CP	Teor de ligante (%)	Parâmetros Marshall					
		Dap	DMT	Vv (%)	Va (%)	VAM (%)	RBV (%)
1	4,0	2,451	2,681	8,59	9,61	18,20	52,81
2	4,0	2,482	2,681	7,42	9,73	17,15	56,75
3	4,0	2,472	2,681	7,78	9,69	17,47	55,49
4	4,5	2,524	2,658	5,04	11,14	16,17	68,86
5	4,5	2,509	2,658	5,63	11,07	16,69	66,30
6	4,5	2,499	2,658	5,98	11,03	17,00	64,85
7	5,0	2,540	2,636	3,65	12,45	16,10	77,31
8	5,0	2,545	2,636	3,45	12,48	15,92	78,35
9	5,0	2,529	2,636	4,05	12,40	16,45	75,38
10	5,5	2,531	2,614	3,18	13,65	16,83	81,09
11	5,5	2,551	2,614	2,43	13,75	16,18	84,99
12	5,5	2,556	2,614	2,24	13,78	16,02	86,01
13	6,0	2,549	2,593	1,67	15,00	16,67	89,97
14	6,0	2,560	2,593	1,28	15,06	16,34	92,16
15	6,0	2,553	2,593	1,53	15,02	16,55	90,76

Fonte: os Autores.

A análise da Tabela 4 também permite observar a elevada coerência entre os parâmetros volumétricos ao longo dos diferentes teores de ligante, evidenciando a estabilidade do processo experimental. A evolução simultânea de Dap, Va, Vv e RBV ocorre de forma contínua, sem inversões inesperadas, o que reforça a qualidade da moldagem, da homogeneização e das medições realizadas. Nota-se ainda que a região entre 4,5% e 5,0% correspondem ao intervalo de maior ganho de densificação, enquanto a partir de 5,0% a mistura entra em um regime de saturação, no qual o aumento de Va deixa de contribuir para o empacotamento mineral e passa a atuar predominantemente como lubrificante. Esse comportamento confirma a existência de uma transição clara entre as fases de densificação e de excesso de ligante, característica de misturas densas bem estruturadas.

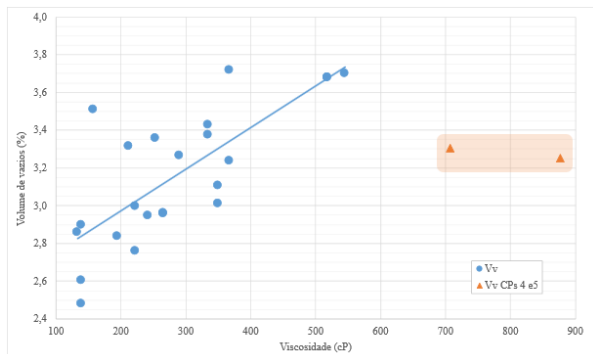
Outro aspecto relevante extraído da Tabela 4 é a convergência de parâmetros críticos no entorno do teor ótimo, reforçando sua escolha técnica. Valores de Vv próximos de 4%, RBV superior a 75% e Va acima de 12% indicam um ponto de equilíbrio físico que compatibiliza resistência, durabilidade e estabilidade volumétrica. Por outro lado, teores acima de 5,5% demonstram uma redução acentuada do Vv associada a aumentos expressivos de RBV, condição que sugere maior propensão à exsudação e instabilidade por excesso de ligante. A manutenção do VAM em uma faixa estreita ao longo de todos os teores reforça a consistência da estrutura mineral da mistura e confirma que, neste caso, o teor de projeto é controlado principalmente pelos parâmetros Vv e RBV. Esses elementos complementam a interpretação da dosagem Marshall, mostrando que o comportamento da mistura se alinha ao esperado para concretos asfálticos densos bem compactados.

### 3.2. Resultados da influência da variação da viscosidade nos parâmetros

## volumétricos

### 3.2.1. VOLUME DE VAZIOS E RELAÇÃO BETUME-VAZIOS

Os resultados do volume de vazios (Vv) em função da variação de viscosidade do ligante das misturas densas estão apresentados na Figura 3.



**Figura 3.** Resultados de variação do volume de vazios em função da viscosidade. **Fonte:** os Autores.

Os resultados apresentados na Figura 3 evidenciam o comportamento esperado da relação entre a viscosidade do ligante e o volume de vazios (Vv), em conformidade com a literatura. O volume de vazios (Vv) apresenta uma tendência clara de redução à medida que a viscosidade do ligante diminui. Esse comportamento é compatível com o efeito esperado da trabalhabilidade, uma vez que viscosidades mais elevadas dificultam o rearranjo dos agregados durante a compactação, resultando em maiores volumes de vazios, enquanto viscosidades mais baixas favorecem o escoamento do ligante e a acomodação da estrutura granular, reduzindo o Vv. O comportamento observado na Figura 3 evidencia esse padrão de forma consistente, com valores mais elevados de vazios nos grupos que representam as maiores viscosidades e valores decrescentes à medida que o ligante se torna menos viscoso.

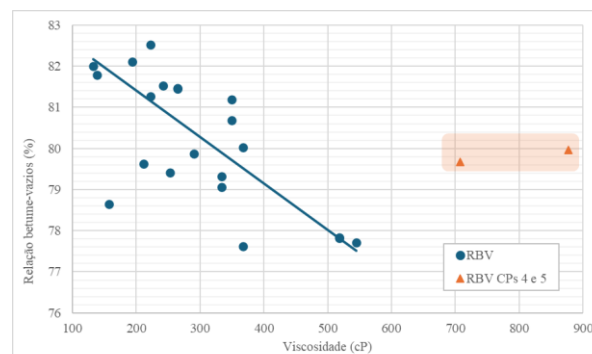
Observa-se que os corpos de prova com viscosidades correspondentes a temperaturas inferiores a 120 °C apresentaram um comportamento diferenciado em relação aos demais, reforçando a indicação de Androjić e Dimter (2015)<sup>5</sup> de que essa temperatura representa o limite inferior recomendado para a compactação.

Outro aspecto perceptível na Figura 3 é que os corpos de prova compactados em condições muito extremas de viscosidade se afastam da tendência geral. Os pontos correspondentes às maiores viscosidades apresentam Vv significativamente mais altos, sugerindo compactação insuficiente, enquanto nas viscosidades mais baixas o Vv tende a se aproximar do limite inferior típico para misturas densas. Esse comportamento reforça que a viscosidade no momento da compactação exerce controle direto sobre a densidade e a conformação interna da mistura, afetando de modo sensível a capacidade de redução de vazios. Assim, a Figura 3 demonstra que variações relativamente pequenas na viscosidade podem provocar

diferenças perceptíveis na estrutura volumétrica final dos corpos de prova.

### 3.2.2. RELAÇÃO BETUME-VAZIOS

Os resultados da relação betume-vazios (RBV) em função da variação de viscosidade durante a compactação das misturas densas estão apresentados na Figura 4. Assim como observado para o Vv, o comportamento da RBV também esteve em conformidade com a literatura, na qual se espera a redução com o aumento da viscosidade.



**Figura 4.** Resultados de variação da relação betume-vazios em função da viscosidade. **Fonte:** os Autores.

A análise da Figura 4 permite entender que a relação betume-vazios (RBV) diminui progressivamente conforme a viscosidade do ligante aumenta. Essa tendência é coerente com o comportamento físico observado na Figura 3, já que valores mais altos de viscosidade resultam em maiores volumes de vazios, reduzindo a proporção do ligante efetivamente inserido nesses espaços. Quando a viscosidade é menor, a mistura apresenta maior facilidade de acomodação, levando a um preenchimento mais eficiente dos vazios e, consequentemente, a valores mais elevados de RBV. Assim, na Figura 4 fica evidenciado que a RBV acompanha diretamente as condições de trabalhabilidade impostas pela viscosidade no momento da compactação.

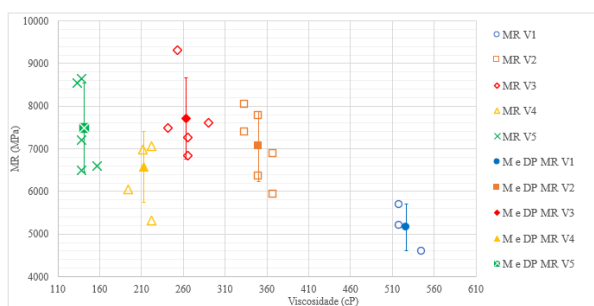
Também é possível observar na Figura 4 que as maiores variações de RBV ocorrem justamente nas faixas extremas de viscosidade, onde a mistura se afasta das condições consideradas ideais de compactação. Os grupos com viscosidade muito elevada concentram os menores valores de RBV, indicando que o ligante não consegue penetrar adequadamente na estrutura granular. Por outro lado, os pontos associados às menores viscosidades apresentam RBV mais altas, sugerindo maior mobilidade do ligante e melhor preenchimento dos vazios. Essa leitura visual reforça o papel direto da viscosidade na distribuição interna do ligante e na eficiência do processo de compactação, confirmando a forte relação entre Vv e RBV observada nas análises volumétricas.

## 3.3. Resultados da influência da variação de temperatura nos parâmetros mecânicos

Em razão do comportamento dos corpos de prova 4 e 5, decidiu-se realizar a análise dos parâmetros mecânicos com base apenas na variação das respostas dos demais corpos de prova. A seguir, é apresentado os resultados do ensaio de módulo de resiliência e de tração por compressão diametral.

### 3.3.1. ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados de módulo de resiliência (MR), bem como as médias (M) e os desvios padrão (DP) referentes a cada grupo de variação de viscosidade estão apresentados na Figura 5.



**Figura 5.** Resultados dos ensaios de módulo de resiliência. **Fonte:** os Autores.

De acordo com os dados apresentados na Figura 5, ao se analisar as médias dos grupos, verifica-se que o módulo de resiliência (MR) aumenta à medida que a viscosidade se aproxima do valor de projeto, apresentando diminuição quando a viscosidade se afasta desse intervalo. Esse comportamento indica que a resposta mecânica imediata da mistura é sensível ao estado reológico do ligante no momento da compactação, sendo favorecida quando a mistura se encontra em uma condição que permite boa acomodação interna sem perda de estrutura.

Além disso, a Figura 5 evidencia a diferença na uniformidade dos resultados dentro de cada grupo. Os grupos associados às viscosidades intermediárias apresentam menor dispersão entre os valores individuais, sugerindo maior homogeneidade estrutural. Em contrapartida, grupos com viscosidades muito elevadas ou muito reduzidas mostram variações mais acentuadas, o que indica que condições extremas prejudicam não apenas o nível de rigidez recuperável, mas também a consistência entre os corpos de prova. Dessa forma, a representação gráfica destaca que a viscosidade influencia simultaneamente a magnitude e a regularidade das respostas mecânicas obtidas.

Esse comportamento reforça a importância de manter a viscosidade adequada, de modo a garantir rigidez suficiente da mistura, sem comprometer a trabalhabilidade ou acelerar o envelhecimento do ligante, o que impacta diretamente na durabilidade do pavimento.

Adotando-se a hipótese nula ( $H_0$ ) de que não há diferença entre as médias e a hipótese alternativa ( $H_1$ ) de que há diferença, foi realizada a análise de variância e aplicado o teste t para comparação das médias de

MR, tendo como referência a viscosidade de projeto. Os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5.** Comparação das médias de MR.

Comparação	V1	V2	V4	V5
Teste t	0,0029	0,1274	0,02986	0,3742
Hipótese	H1	H0	H1	H0

**Fonte:** os Autores.

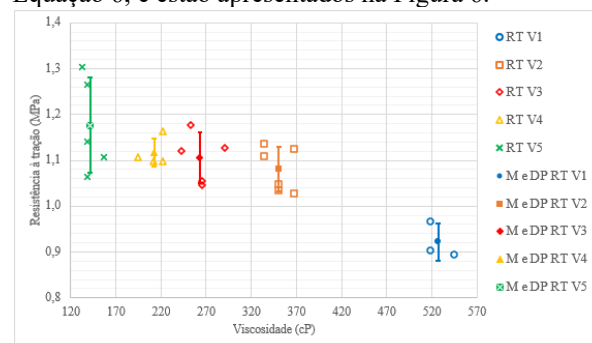
Ao se considerar o teste estatístico com significância de 5%, entende-se que não há diferença significativa das médias do MR da temperatura de projeto quando comparado com as médias do MR dos grupos de viscosidade V2 e V5, diferentemente do que acontece em V1 e V4.

Outro ponto relevante da Tabela 5 é que os grupos V2 e V5, apesar de representarem condições superiores e inferiores à viscosidade de projeto, mantêm valores estatisticamente equivalentes ao grupo de referência. Isso demonstra que a mistura apresenta um intervalo operacional relativamente amplo no qual a rigidez recuperável não é prejudicada, reforçando uma margem prática de trabalhabilidade importante para situações de campo. Já os resultados dos grupos V1 e V4, que se diferenciam significativamente, delimitam de forma clara os extremos em que a viscosidade passa a comprometer o desempenho mecânico. Dessa forma, a Tabela 5 contribui para identificar os limites superior e inferior em que o MR deixa de se comportar de maneira estável.

Mediante essa análise é possível confirmar que não há viabilidade técnica de se compactar a mistura asfáltica em viscosidades menores que a de projeto, haja vista a maior probabilidade de envelhecimento do ligante asfáltico, além do gasto energético de aquecimento. No entanto, há possibilidade de se compactar a mistura em intervalos de viscosidade ligeiramente superiores à de projeto (até cerca de 367 cP) sem que haja prejuízo ao MR.

### 3.3.2. ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados do ensaio de resistência à tração (RT) por compressão diametral foram obtidos por meio da Equação 6, e estão apresentados na Figura 6.



**Figura 6.** Resultados dos ensaios de resistência a tração por compressão diametral. **Fonte:** os Autores.

Com base na análise da Figura 6, observa-se que, em relação às médias dos grupos, o valor de RT diminui com o incremento da viscosidade. Esse fato é



importante, pois comprova que não houve perda de adesividade no intervalo de viscosidades estudado.

Os valores de resistência à tração (RT) tendem a aumentar à medida que a viscosidade do ligante se reduz durante a compactação. Os grupos associados às menores viscosidades apresentam, de modo geral, valores mais elevados de RT, enquanto os grupos compactados em condições de maior viscosidade exibem resistências médias menores. Esse comportamento indica que a mistura suporta maiores tensões de tração quando o ligante se encontra em um estado reológico menos rígido no momento da compactação, o que sugere uma interação mais intensa entre o esqueleto mineral e o ligante nas faixas de viscosidade mais baixas.

A Figura 6 indica que as diferenças entre as médias dos grupos não são abruptas, mas seguem uma tendência relativamente gradual de redução da RT à medida que se avança para condições de maior viscosidade. Além disso, a dispersão dos resultados dentro de cada grupo permanece contida, o que indica boa repetibilidade dos ensaios e homogeneidade dos corpos de prova em todas as condições de compactação avaliadas. Dessa forma, a viscosidade exerce influência perceptível sobre a resistência à tração, mas sem provocar comportamentos instáveis ou inconsistentes entre os grupos experimentais, o que reforça a confiabilidade dos resultados obtidos.

Na Tabela 6 é possível encontrar os dados do teste t, com significância de 5%.

**Tabela 6.** Comparação das médias de RT.

Comparação	V1	V2	V4	V5
Teste t	0,0013	0,2265	0,3586	0,1075
Hipótese	H1	H0	H0	H0

Fonte: os Autores.

De acordo com o teste estatístico apresentado na Tabela 6, apenas o grupo correspondente à maior viscosidade (V1) apresentou diferença estatística significativa em relação à condição de referência, enquanto os demais grupos não diferiram entre si ao nível de 5%. Esse resultado indica que a resistência à tração é mais sensível ao aumento da viscosidade do que à sua redução, evidenciando um comportamento assimétrico da mistura em relação às condições de compactação. A ausência de diferenças significativas entre os grupos V2, V4 e V5 demonstra que a mistura mantém desempenho mecânico equivalente em uma faixa relativamente ampla de viscosidade, sugerindo que variações moderadas na temperatura de compactação não comprometem de forma relevante a resistência à tração.

A análise da Tabela 6 revela que o grupo V1 se destaca como a única condição que altera significativamente a RT, apontando que viscosidades excessivamente elevadas produzem um comportamento mecânico distinto das demais condições analisadas. Essa distinção reforça a necessidade de evitar compactações em faixas de viscosidade demasiadamente altas, uma vez que elas resultam em

respostas mecânicas que se afastam do padrão observado para as demais condições operacionais. Ao mesmo tempo, os resultados confirmam que a mistura apresenta boa tolerância à compactação em viscosidades abaixo da referência, sem perda estatística de desempenho, corroborando a robustez do material frente a pequenas variações nas condições térmicas de campo.

Assim, considerando o objetivo de se compactar a mistura sem comprometer a resistência à tração (RT), conclui-se que é viável realizar a compactação em viscosidades próximas ou ligeiramente inferiores à de projeto, correspondentes aos grupos V2 e V3.

### 3.4. Análise conjunta do Resultados

A avaliação conjunta dos parâmetros volumétricos e mecânicos mostra que a viscosidade do ligante condiciona de maneira consistente o comportamento observado ao longo dos ensaios. Os resultados de volume de vazios e relação betume-vazios apresentaram variações coerentes com o estado reológico do ligante durante a compactação, indicando que as faixas intermediárias favoreceram a redução dos vazios e o preenchimento mais eficiente da estrutura mineral. Já as viscosidades extremas, sobretudo as mais elevadas, mostraram tendência a aumentar o Vv e reduzir a RBV, caracterizando um estado de compactação menos eficiente e uma distribuição menos uniforme do ligante entre os agregados.

Ao relacionar esses achados com os ensaios mecânicos, observa-se que os grupos compactados em viscosidades próximas à condição adotada como referência também apresentaram valores mais equilibrados de módulo de resiliência e resistência à tração. A menor dispersão intragrupo nesses níveis intermediários sugere maior uniformidade entre os corpos de prova, enquanto as faixas extremas apresentam variação mais acentuada das respostas mecânicas, compatível com as alterações volumétricas previamente identificadas. Esses resultados são reforçados pelos testes estatísticos, que evidenciam sensibilidade diferenciada da mistura à variação da viscosidade, com significância apenas nas condições que se afastam de forma mais acentuada da faixa intermediária.

De maneira integrada, os resultados mostram que as tendências volumétricas e mecânicas são convergentes, e que as mudanças observadas em um parâmetro encontram correspondência nos demais. Essa coerência entre os diferentes conjuntos de dados evidencia que o comportamento global da mistura é fortemente influenciado pela condição reológica do ligante no momento da compactação, permitindo compreender de forma mais ampla a relação entre trabalhabilidade, densificação obtida e desempenho mecânico imediato.

## 4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos indicam que variações na viscosidade do ligante durante a compactação exercem influência significativa sobre as propriedades

volumétricas e mecânicas das misturas asfálticas densas, corroborando a premissa inicial deste estudo. Com base nas análises, é possível concluir que:

i. O aumento da viscosidade no momento da compactação leva ao aumento do volume de vazios e à diminuição da relação betume-vazios;

ii. Os corpos de prova compactados a temperaturas inferiores a 120 °C apresentaram comportamento distinto em relação à variação de temperatura quando comparados aos compactados em temperaturas superiores;

iii. A faixa de viscosidade que permitiu a obtenção do melhor módulo de resiliência situou-se próxima à viscosidade de projeto ou ligeiramente superior (aproximadamente entre 265 cP e 367 cP). Comportamento similar foi observado no ensaio de resistência à tração;

iv. A resistência à tração se apresentou com comportamento crescente com a diminuição da viscosidade, o que indica que não houve perda de adesividade dentro da faixa de temperaturas estudada.

Observa-se também que os parâmetros volumétricos e mecânicos apresentaram comportamento convergente, indicando que as variações de densificação estiveram diretamente relacionadas à resposta estrutural obtida nos ensaios de MR e RT. Essa coerência interna reforça a consistência dos efeitos da viscosidade observados ao longo do estudo.

De forma complementar, os resultados obtidos evidenciam que pequenas variações de viscosidade dentro da faixa operacional estudada não alteraram de maneira abrupta o comportamento da mistura, o que indica uma zona de trabalho relativamente estável para execução em campo, desde que respeitados os limites superiores e inferiores identificados nas análises.

Nesse contexto, a presente pesquisa oferece contribuições relevantes para a sociedade e para a infraestrutura urbana. Os resultados obtidos indicam que a temperatura de compactação exerce influência direta sobre aspectos que estão intrinsecamente relacionados à durabilidade e ao desempenho funcional das vias pavimentadas. O controle adequado da viscosidade pode favorecer a obtenção de revestimentos com maior vida útil, menor ocorrência de falhas prematuras e, consequentemente, redução nos custos com manutenção e reabilitação.

A consistência entre os diferentes conjuntos de resultados evidencia que o controle reológico do ligante exerce influência direta sobre o comportamento imediato da mistura, reforçando a relevância de monitorar a viscosidade durante a compactação como variável determinante para a estabilidade inicial do revestimento.

Dessa forma, ao esclarecer de maneira integrada como a viscosidade influencia a densificação e o comportamento mecânico imediato das misturas asfálticas densas, este estudo oferece subsídios técnicos que podem aprimorar o controle de campo e a execução das camadas de revestimento. A compreensão

mais precisa dos limites operacionais de compactação contribui para a produção de pavimentos mais uniformes e eficientes, refletindo diretamente na melhoria do desempenho funcional das vias. Ao fortalecer o embasamento técnico relacionado ao controle reológico, os resultados aqui apresentados ampliam o entendimento sobre práticas que favorecem maior durabilidade e estabilidade dos sistemas de transporte.

Como sugestão para pesquisas futuras, recomenda-se a análise da vida de fadiga com o objetivo de avaliar os efeitos da oxidação do ligante asfáltico, possivelmente intensificada em temperaturas mais elevadas. Esse aprofundamento permitirá uma compreensão mais abrangente do desempenho a longo prazo das misturas asfálticas, contribuindo para o aprimoramento do entendimento técnico sobre os efeitos das variações de temperatura no comportamento mecânico dos pavimentos.

## 5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Laboratório de Pavimentação da UEM (Lapav), pela disponibilidade dos equipamentos e auxílio técnico da Me. Lúcia Tiemi Yano, e à Extracon® Mineração e Obras Ltda., pelo fornecimento dos materiais.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Wintruff NC, Fernandes Júnior JL. A Review on Life Cycle Assessment of Pavements in Brazil: Evaluating Environmental Impacts and Pavement Performance Integrating the International Roughness Index. *Sustainability*. 2023; 15(18): 1-20.
- [2] Rudrokasworo SN, Hadiwardoyo SP, Rifai, AI, *et al.* Statistical Approach of Additive Effect on Volumetric Characteristics of Asphalt Mixtures. *Engineering Proceedings*. 2025; 84(1).
- [3] Lucena MCC, Soares AS, Soares, JB, *et al.* Reologia de asfaltos brasileiros puros e modificados por SBS. In: XVII Congresso De Ensino E Pesquisa Em Transportes (XVIII ANPET), 18., 2004, Florianópolis. Anais [...]. Rio de Janeiro: ANPET, 2004.
- [4] Bernucci LB, Motta LMG, Ceratti JAP, *et al.* Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 2ª Ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022.
- [5] Androjić I, Dimter S. Influence of compaction temperature on the properties of marshall specimens. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2015; 10(4): 309-315.
- [6] National Asphalt Pavement Association – NAPA. Design and Constructing SMA Mixtures: State of the Practice. Lanham, Maryland: Quality Improvement Series 122, 2002.
- [7] Asphalt Institute. The Asphalt Handbook. 7. ed. Lexington: Asphalt Institute, 1989.
- [8] Roberts FL, Kandhal PS, Brown ER, *et al.* Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction. 2. ed. Lanham: NAPA Education Foundation, 1996.
- [9] Mousavi M, Pahlavan F, Oldham D, *et al.* Multiscale Investigation of Oxidative Aging in Biomodified Asphalt Binder. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2016; 120 (31): 17224-17233.

- [10] Read J, Whiteoak D. The Shell Bitumen Handbook, Fifth Edition. London, England: Thomas Telford Ltd., 2003.
- [11] Rahmat NA, Hassan NA, Jaya RP, *et al.* Effect of compaction temperature on the performance of dense-graded asphalt mixture. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019; 244.
- [12] Neto AS, Oliveira FHL, Aguiar, MFP, *et al.* Avaliação dos parâmetros Marshall em misturas asfálticas de CBUQ com diferentes temperaturas durante a compactação. In: Congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica (COBRAMSEG), 20; Simpósio brasileiro de mecânica das rochas, 9; Simpósio brasileiro de engenheiros geotécnicos jovens, 9; Conferência Sul-Americana de engenheiros geotécnicos jovens, 6. 2020.
- [13] Ismail S, Abdul Hassan N, Yaacob H, *et al.* Properties of dense-graded asphalt mixture compacted at different temperatures. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019; 220.
- [14] Kök B, Yilmaz M. The effects of using lime and styrene-butadiene-styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt. Construction and Building Materials. 2009. 23: 1999-2006.
- [15] Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 081/98: Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.
- [16] Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 084/95: Agregado miúdo – Determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995.
- [17] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 031/2024 – ES: Pavimentação – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2024.
- [18] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 15184: Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- [19] Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural E Biocombustíveis. Resolução ANP n° 897, de 18 de novembro de 2022.
- [20] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 6576: Materiais asfálticos – Determinação de penetração. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- [21] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 6576: Ligantes asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- [22] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 11341: Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- [23] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 178/2018 – PRO: Pavimentação asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicosnbr usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall. Rio de Janeiro, 2018.
- [24] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 135/2018 - ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- [25] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 136/2018 – ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.