

## **CURVAS MESTRAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS EMPREGANDO BANCO DE DADOS: INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E DO TIPO DE LIGANTE**

AMANDA DO SACRAMENTO ROBE<sup>1</sup>; LUCAS ADRIEL RODRIGUES CARDOSO<sup>2</sup>; NICOLE LEIVAS GOMES<sup>3</sup>; LUIZY BORGES VIEGAS<sup>4</sup>; PRISCILA MILECH THEISEN<sup>5</sup>; KLAUS MACHADO THEISEN<sup>6</sup>;

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – amandasrobe@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas – lucascardosor.c2@gmail.com

<sup>3</sup>Universidade Federal de Pelotas – nicolegomesufpel@gmail.com

<sup>4</sup>Universidade Federal de Pelotas – viegasluzi@gmail.com

<sup>5</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul – priscila.milech@gmail.com

<sup>6</sup>Universidade Federal de Pelotas – theisenkm@yahoo.com.br

### **1. INTRODUÇÃO**

O estudo do comportamento mecânico das misturas asfálticas é fundamental para garantir durabilidade e desempenho nos pavimentos, especialmente frente às variações de temperatura e cargas de tráfego. Desta forma, o módulo dinâmico (MD) se destaca como um dos principais parâmetros utilizados no dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos, pois representa a rigidez da mistura asfáltica quando submetida a carregamentos cíclicos (NUNES, 2021).

O MD é obtido por ensaios laboratoriais onde corpos de prova são submetidos a esforços repetidos sob diferentes frequências e temperaturas, simulando condições atuantes nos pavimentos. Os resultados são organizados em gráficos chamados curvas mestras, que permitem visualizar o comportamento da mistura ao longo de uma ampla faixa de condições, mesmo as que não foram testadas diretamente (NUNES, 2021). Para obtenção dessas curvas utiliza-se o princípio da superposição tempo-temperatura (PSTT), que permite deslocar os dados obtidos em diferentes temperaturas para uma mesma referência, utilizando o fator de translação (aT). Entre os métodos de ajuste, destacam-se o modelo de Williams, Landel e Ferry (WLF) e modelos polinomiais (VESTENA *et al.*, 2021).

Muitos estudos mostram que o tipo de material influencia na forma e nos valores das curvas mestras. Misturas com modificadores como asfalto-borracha, apresentam curvas mais estáveis termicamente (NUNES, 2021). Em valores típicos, misturas asfálticas convencionais podem apresentar MD entre 1000 e 5000 MPa a 20 °C, enquanto aquelas com adição de borracha atingem valores superiores a 12000 MPa na mesma faixa de temperatura.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal a formação de um banco de dados contendo módulos dinâmicos (MDs) de misturas asfálticas com diferentes composições e características. A partir desses dados, busca-se a construção de curvas mestras específicas para cada conjunto, as quais, posteriormente, poderão servir de base para a elaboração de curvas mestras gerais que representem, de forma mais ampla, o comportamento desses materiais. Essa sistematização visa fornecer subsídios técnicos para a compreensão mais aprofundada das propriedades reológicas e mecânicas das misturas asfálticas, contribuindo para o avanço das metodologias de análise e para a melhoria da previsão de desempenho.

## 2. METODOLOGIA

Inicialmente, foi feito a partir de um levantamento de dados experimentais de MD encontrados na literatura. A busca foi direcionada para misturas asfálticas com diferentes granulometrias (faixas B e C do DNIT), e também para diferentes tipos de ligante, considerando o CAP 50/70 e ligantes modificados diversos.

Após a coleta, os dados foram organizados em um banco, reunindo as informações de temperatura, frequência e valores de MD. Em seguida, as misturas foram separadas em quatro grupos principais: Faixa B, Faixa C, CAP 50/70 e ligante modificado. Essa divisão possibilitou analisar de forma mais detalhada as diferenças no comportamento mecânico de cada grupo, através da obtenção de suas curvas mestras.

Para a construção da curva mestra, utilizou-se o PSTT. O deslocamento foi feito assumindo-se o fator de translação ( $aT$ ) como modelo polinomial quadrático do tipo  $\log(aT) = c_2 \cdot (T - T_r)^2 + c_1 \cdot (T - T_r)$ , onde  $T$  é a temperatura,  $T_r$  a temperatura de referência (onde  $\log(aT) = 0$ ) e  $c_2$  e  $c_1$  são constantes. O ajuste da curva mestra foi feito utilizando-se o modelo sigmoidal padrão da literatura.

A partir desses ajustes, foram obtidas as constantes do modelo sigmoidal mencionado, bem como os MD's mínimo e máximo ( $E_0$  e  $E_{inf}$ , respectivamente), utilizando-se a ferramenta "Atingir Meta" do Microsoft Excel, partindo-se de valores iniciais de  $E_0$  e  $E_{inf}$ , variando-se ciclicamente  $E_0$  e após  $E_{inf}$  de forma a reduzir o erro percentual médio absoluto (EPMA) dos dados experimentais com relação aos previstos pelo ajuste sigmoidal. Iterações de variação de  $E_0$  e  $E_{inf}$  foram realizadas até que a diferença percentual do EPMA entre uma iteração e outra fosse menor um igual a 1%. Os valores finais obtidos foram reunidos em tabelas comparativas, apresentadas na seção de Resultados e Discussão.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

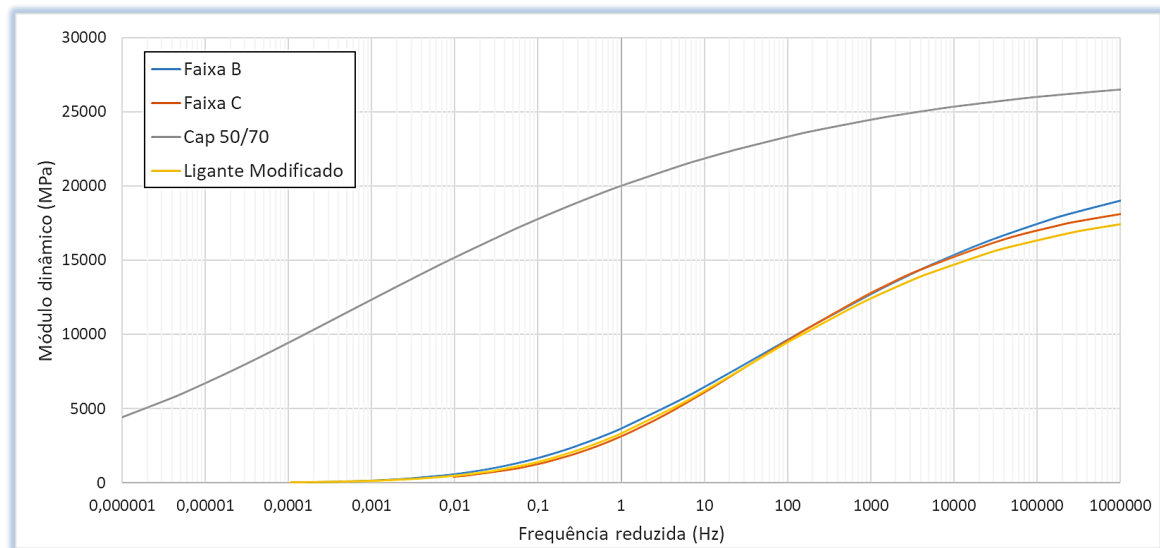
A Tabela 1 reúne os parâmetros obtidos pelo ajuste sigmoidal das curvas mestras, que permitem caracterizar a rigidez das misturas e a qualidade do ajuste do modelo.

Tabela 1 – Resultados do ajuste das curvas mestras para as misturas asfálticas.  
Fonte: autores, 2025.

Misturas	Faixa B	Faixa C	Cap 50/70	Ligante Modificado
<b><math>E_0</math> (MPa)</b>	0,00098732	3,43	5,16	2,36
<b><math>E_{inf}</math> (MPa)</b>	22599	19854	27854	19156
<b>A</b>	0,12	0,27	0,04	0,24
<b>B</b>	-0,41	-0,54	-0,32	-0,52
<b><math>c_1</math></b>	-0,10	-0,08	-0,11	-0,09
<b><math>c_2</math></b>	0,00088384	0,001455363	0,00041329	0,000673872
<b><math>R^2</math></b>	0,96	0,93	0,94	0,89
<b>EPM (%)</b>	16,24	22,18	14,13	21,56

A figura 1 ilustra as curvas mestras obtidas para cada mistura asfáltica permitindo uma análise mais clara da tendência de cada grupo, tendo em vista que a utilização do gráfico facilita a comparação visual entre os diferentes tipos de misturas.

Figura 1: curvas mestras resultantes das misturas. Fonte: autores, 2025



A análise das curvas mestras permitiu identificar diferenças importantes no comportamento das misturas. As misturas da Faixa B apresentaram maior rigidez, evidenciada pelos valores mais altos de módulo dinâmico ( $E_{inf}$ ) em comparação à Faixa C, além de um ajuste consistente, indicado pelo maior coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,96$ ). Isso mostra que se trata de uma mistura mais estável, ou seja, menos sujeita a variações bruscas de comportamento ao longo da faixa de frequências. Já as misturas da Faixa C revelaram maior variabilidade, com rigidez mais baixa (valores menores de  $E_0$  e  $E_{inf}$ ) e maior erro percentual médio ( $EPM = 22,18\%$ ), o que indica maior dispersão dos pontos experimentais em relação ao ajuste. Essa diferença pode estar relacionada à granulometria, visto que a distribuição mais fina e menos uniforme da Faixa C reduz a capacidade da mistura de resistir aos carregamentos.

O grupo com ligante CAP 50/70 se destacou por apresentar os melhores resultados gerais, combinando elevada rigidez máxima ( $E_{inf} = 27.854$  MPa) com o menor erro percentual entre as misturas ( $EPM = 14,13\%$ ). Isso significa que o ajuste representou muito bem os dados experimentais, reforçando que o ligante convencional apresenta comportamento mais previsível e uniforme, sendo adequado como referência para comparações.

Por outro lado, as misturas com ligante modificado apresentaram maior dispersão dos resultados, evidenciada pelo menor valor de  $R^2$  (0,89) e pelo elevado erro percentual (21,56%). Esse comportamento está ligado à variabilidade introduzida pelo aditivo polimérico, que, embora traga benefícios em termos de desempenho em campo (como maior resistência a deformações permanentes e melhor estabilidade térmica), torna o ajuste estatístico mais difícil e aumenta a dispersão dos resultados.

De forma geral, os resultados mostram que tanto a granulometria quanto o tipo de ligante exercem influência decisiva no módulo dinâmico das misturas asfálticas.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos confirmam a relevância da análise das curvas mestras para compreender o comportamento mecânico das misturas asfálticas. As comparações realizadas permitem destacar que:

- A Faixa B apresentou maior rigidez máxima em relação à Faixa C, evidenciando a influência da granulometria na estrutura da mistura.
- O CAP 50/70 foi o ligante com maiores módulos dinâmicos no ajuste, combinando elevada rigidez máxima e baixo erro percentual.
- As misturas com ligante modificado mostraram maior dispersão nos resultados, possivelmente pela complexidade adicional trazida pelos polímeros.

A principal inovação deste trabalho foi a organização de um banco de dados com parâmetros comparativos entre diferentes misturas e ligantes, utilizando ajustes sigmoidais para obtenção das curvas mestras. Esse banco servirá de base para análises futuras, permitindo verificar de forma mais aprofundada como a granulometria e o tipo de ligante impactam na durabilidade e no desempenho dos pavimentos.

Como próximos passos, recomenda-se a ampliação da base de dados utilizada, de modo a contemplar um conjunto mais robusto e representativo de informações. Além disso, sugere-se a realização de novas análises comparativas e exploratórias, incorporando não apenas misturas convencionais, mas também formulações com asfalto-borracha e outros modificadores poliméricos ou químicos. Essa abordagem permitirá avaliar, de forma mais abrangente, os efeitos desses aditivos sobre o desempenho mecânico, reológico e ambiental dos materiais. Com isso, será possível fornecer um panorama mais completo e consistente acerca do comportamento das misturas asfálticas, subsidiando tanto a prática de projeto e manutenção de pavimentos quanto a formulação de políticas públicas e diretrizes técnicas voltadas para a sustentabilidade e durabilidade da infraestrutura viária.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

NUNES, C. G. L. **Curvas mestras de misturas asfálticas com adição de borracha: efeito da granulometria e dosagem**. 2021. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba. Disponível em: [https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/21478/1/CamilaGon%C3%A7alvesLuzNunes\\_Dissert.pdf](https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/21478/1/CamilaGon%C3%A7alvesLuzNunes_Dissert.pdf). Acesso em: 28 jun. 2025.

VESTENA, K. et al. **Segmentos experimentais na BR-116/RS empregando TLAflex, HiMA e 5575-E SBS: caracterização avançada e monitoramento**. ResearchGate, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/381291426>. Acesso em: 29 jun. 2025.

RABELO, K. M. et al. **Determinação do módulo dinâmico de misturas asfálticas por meio de testes ultrassônicos**. ResearchGate, 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/376702629>. Acesso em: 03 jul. 2025.