

CURVA MESTRA DE MÓDULO DINÂMICO: UM MODELO SIMPLIFICADO BASEADO NA CORRELAÇÃO ENTRE LIMITES TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS

NICOLE LEIVAS GOMES¹; CHAYANE COSTA LOBO²; LAUREN VASQUES HOLZ³; LUIZY BORGES VIEGAS⁴; PRISCILA MILECH THEISEN⁵; KLAUS MACHADO THEISEN⁶;

¹Universidade Federal de Pelotas – nicolegomesufpel@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – contatochayanelobo@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – teclaurenholz@outlook.com

⁴Universidade Federal de Pelotas – viegasluizy@gmail.com

⁵Universidade Federal do Rio Grande do Sul – priscila.milech@gmail.com

⁶Universidade Federal de Pelotas – theisenkm@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

Os pavimentos são obras projetadas para suportar o tráfego e as mudanças climáticas, entretanto, deterioram-se no tempo em função desses fatores. Diante disso e com a chegada do método MeDiNa, tornou-se fundamental obter parâmetros mais precisos para projetar pavimentos asfálticos, parâmetros derivados de testes cílicos que simulam as condições *in situ* dos pavimentos (MOTA *et al.*, 2024). Nesse contexto, o módulo dinâmico (MD) é um parâmetro fundamental que indica o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas, quantificando a rigidez do material considerando a frequência da carga e a temperatura. Segundo GOUVEIA (2016), o MD auxilia os engenheiros a entenderem como a mistura reage em vários cenários, desde o calor do verão com tráfego lento até o frio do inverno com veículos rápidos.

No ensaio de MD, amostras de misturas asfálticas são expostas a cargas repetidas em diferentes frequências e temperaturas para coletar dados que visam o projeto de misturas asfálticas. SOARES *et al.* (2003) afirmam que tais informações são cruciais para aprimorar a composição do material, buscando um equilíbrio entre rigidez e flexibilidade. A realização do ensaio no Brasil baseia-se em normas técnicas, sendo a principal a DNIT ME 416/2019 (DNIT, 2019).

Segundo GARCIA e THOMPSON (2007), a relação entre o MD, a frequência e a temperatura podem ser representadas por uma função sigmoidal obtida com o Princípio da Superposição Tempo-Temperatura (PSTT), permitindo a criação de curvas mestras, que são representações gráficas que reúnem os dados de MD obtidos em diferentes temperaturas e frequências em uma única curva. Essa curva é delimitada por assíntotas teóricas: o módulo de equilíbrio (E_0), que representa a rigidez mínima, e o módulo vítreo (E^∞), que representa a rigidez máxima da mistura. Tais constantes não são medidas, mas obtidas por métodos iterativos que ajustam a função aos dados de laboratório, processo que pode exigir uso de ferramentas computacionais complexas (MENSCH, 2017). Os módulos E_0 e E^∞ são teóricos e são uma extração matemática do comportamento do material para as condições teóricas de frequência zero e infinita, fora do escopo do ensaio prático.

O objetivo deste trabalho é, assim, propor um método simplificado para estimar E_0 e E^∞ a partir de uma correlação com os valores de MD mínimo e máximo experimentais. A pesquisa focará em misturas com faixas granulométricas fixas, buscando uma relação numérica que possa ser generalizada para simplificar a construção de curvas mestras, evitando usar métodos iterativos complexos.

2. METODOLOGIA

A metodologia foi estruturada em duas etapas: compilação de um banco de dados e análise do mesmo para desenvolvimento de um modelo simplificado. Para o banco de dados, realizou-se uma busca bibliográfica, onde coletou-se resultados experimentais de MD de misturas asfálticas com distintas granulometrias, padronizadas pelas normas do DNIT, especificamente as faixas B e C.

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 $\log(aT) = c_2 * (T - T_r)^2 + c_1 * (T - T_r)$, 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 parâmetros E_0 e E^∞ , utilizando-se a ferramenta “Atingir Meta” do Microsoft Excel. O processo iterativo de valores iniciais de E_0 e E^∞ , variando-os ciclicamente E_0 e após E^∞ de forma a reduzir o erro percentual médio absoluto (EPMA) entre os dados experimentais e os previstos pelo ajuste. As iterações de variação de E_0 e E^∞ foram realizadas até que a diferença percentual do EPMA entre uma iteração e outra fosse menor ou igual a 1%.

A etapa final da focou em estabelecer uma correlação direta entre os parâmetros teóricos da curva mestra (E_0 e E^∞) e os limites dos dados experimentais de cada mistura (MDmáx; MDmín;). Para isso, foram propostas duas constantes adimensionais. A primeira constante, r , que representa a correlação no limite superior de rigidez, foi calculada como a relação entre o módulo vítreo (E^∞) e o MDmáx experimental, como $E^\infty = r * \text{MDmáx}$; e para o limite inferior, foi determinada a segunda constante, um expoente denominado exp, estabelecendo-se a relação $E_0 = \text{MDmín} / (r^{\text{exp}})$. A determinação dessas duas constantes (r e exp) constitui a base para a validação do modelo simplificado proposto no trabalho, através do cálculo do Erro Percentual Médio (EPM) utilizando os valores de E_0 e E^∞ conforme proposto nas misturas asfálticas empregadas no banco de dados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise comparativa dos resultados revela diferenças e similaridades importantes entre as misturas de Faixa B e Faixa C, vistas na Tabela 1. Embora ambas apresentem E^∞ muito próximos, com valores de 20469 MPa para a Faixa B e 19953 MPa para a Faixa C, seus comportamentos em altas temperaturas são fundamentalmente distintos. Em contraste, o módulo de equilíbrio (E_0) da Faixa B, de 7,98 MPa, é mais de três vezes superior ao da Faixa C, de 2,25 MPa, indicando uma maior resistência à deformação em temperaturas elevadas. Apesar dessa divergência na rigidez residual, a sensibilidade térmica, avaliada pelos coeficientes c_1 e c_2 , mostrou-se relativamente comparável entre as duas.

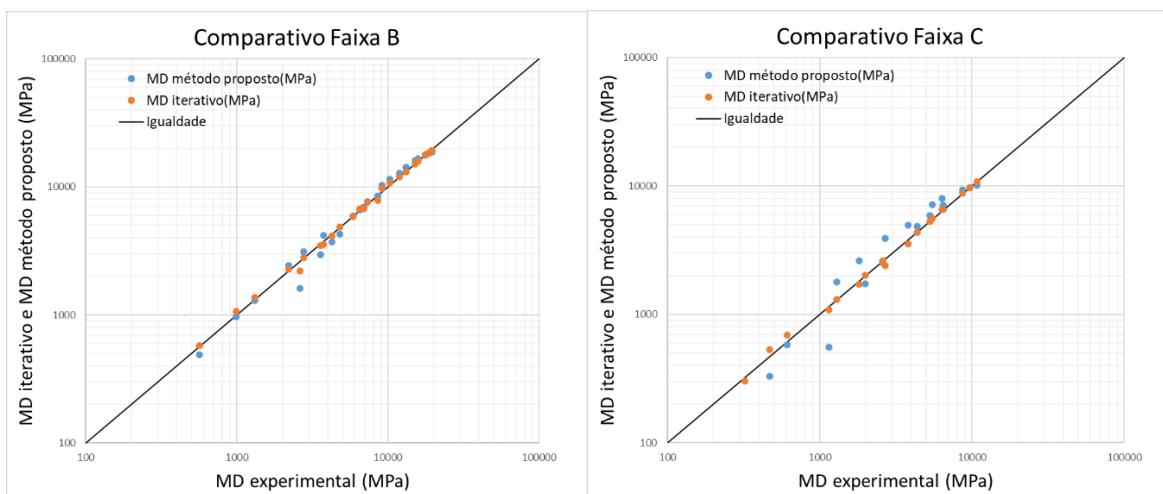
A qualidade do ajuste do modelo sigmoidal foi boa para a Faixa B ($R^2 = 0,9647$) e para a Faixa C ($R^2 = 0,9327$), com ambas apresentando um EPM considerável, em torno de 21-22%. Contudo, a descoberta mais significativa reside nos parâmetros do modelo simplificado proposto: as constantes r e exp se mostraram altamente dependentes da granulometria. A constante r variou de 1,0519 (Faixa B) a 1,0151 (Faixa C), enquanto a constante exp divergiu notavelmente, com 64,18 para a Faixa B e 307,67 para a Faixa C. Como verificação do modelo proposto, realizou-se análise gráfica de correlação, comparando os valores de MD experimentais com os valores previstos pelo método proposto e pelo método

iterativo. A Figura 1 ilustra essa comparação para misturas com ligante CAP 50/70 não modificado, de Faixa B e Faixa C. Os dados experimentais utilizados na verificação foram obtidos dos trabalhos de BOEIRA (2018) e BRUXEL (2015).

Tabela 1: Análise comparativa dos resultados. Fonte: autores, 2025.

MISTURA	E ₀ (Mpa)	E _∞ (Mpa)	A	B	C ₂
Faixa B	7,9813	20469,4447	0,3051	-0,5462	0,001058
Faixa C	2,2553	19952,8379	0,2601	-0,5275	0,001452
MISTURA	C ₁	R ²	EPM (%)	r	exp
Faixa B	-0,093014	0,9647	20,6813	1,0519	64,1838
Faixa C	-0,089526	0,9327	22,1682	1,0151	307,6756

Figura 1: Comparativo de módulos dinâmicos de Faixa B e Faixa C. Fonte: autores, 2025.



Para a Faixa B, observa-se uma excelente correlação para o método proposto, com os pontos apresentando baixa dispersão e grande proximidade à linha de igualdade em toda a faixa de rigidez. Este resultado fornece um indício de validação, validação para o uso dos parâmetros fixos propostos ($r = 1,0519$ e $exp = 64,18$). Para a Faixa C, contudo, nota-se uma dispersão visualmente superior dos pontos em relação à linha de igualdade em comparação à Faixa B. Este comportamento corrobora os resultados numéricos previamente apresentados, que indicaram um R^2 ligeiramente inferior e um EPM maior para esta mistura.

Quantitativamente, a Faixa B, que obteve um excelente alinhamento com os dados experimentais e um EPM de apenas 8,29% utilizando os parâmetros propostos, contra 3,22% do método iterativo completo. Para a Faixa C, a eficácia também foi confirmada, embora com uma precisão ligeiramente inferior, resultando em um EPM de 24,25% para o método proposto, contra 3,95% do método iterativo.

4. CONCLUSÕES

A análise dos resultados demonstrou que a relação entre os limites teóricos e experimentais do MD está diretamente relacionada à faixa granulométrica da mistura. A principal contribuição deste estudo foi a proposição de duas novas constantes, r e $exp.$, para descrever essa relação. Com base nos dados analisados,

os parâmetros propostos para a Faixa B são $r = 1,0519$, $\exp = 64,18$, enquanto para a Faixa C, os valores fixos são $r = 1,0151$ e $\exp = 307,67$.

Em síntese, a análise gráfica comprova a eficácia da abordagem proposta. Fica demonstrado que a utilização de parâmetros r e \exp fixos e característicos para cada faixa granulométrica permite prever com acurácia satisfatória a curva mestra de módulo dinâmico, consolidando o método como uma alternativa viável e muito mais simples que os processos iterativos tradicionais.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação do banco de dados para incluir mais misturas dentro de cada faixa, a fim de refinar os valores propostos e aumentar a robustez estatística do modelo, bem como a investigação de outras faixas granulométricas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOEIRA, Fernando Dekeper. **Estudo da rigidez, da deformação permanente e da fadiga de misturas asfálticas com ligantes convencionais e modificados.** 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

BRUXEL, Daiana Frank. **Estudo do comportamento viscoelástico de concretos asfálticos convencionais e modificados através de ensaios de laboratório e de análise de desempenho.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 416/2019 – ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas: determinação do módulo dinâmico: método de ensaio.** Rio de Janeiro: DNIT, 2019.

GOUVEIA, Beatriz Chagas Silva. **Métodos de previsão e determinação de módulo dinâmico de misturas asfálticas aplicadas em rodovias brasileiras.** 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

MENSCH, Natália Guterres. **Análise viscoelástica de misturas asfálticas quentes e mornas.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

MOTA, Bruno Cavalcante; UBALDO, Mariluce de Oliveira; ARAGÃO, Francisco Thiago Sacramento; NASCIMENTO, Luis Alberto Herrmann do. **Efeito das tensões na deformação permanente de solos e materiais granulares: uma análise a partir de curvas mestras.** In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES – ANPET, 38., 2024. Anais [...]. Rio de Janeiro: ANPET, 2024. Disponível em: <<https://proceedings.science/p/190855?lang=pt-br>>.

SOARES, Jorge Barbosa; SOUZA, Flávio Vasconcelos de. **Considerações sobre módulo resiliente e módulo dinâmico em misturas asfálticas com base na teoria da viscoelasticidade.** In: CONGRESSO IBERO-LATINO-AMERICANO DO ASFALTO – CILA, 2003, Recife. Anais [...]. Recife: CILA, 2003.