

## APLICAÇÃO DE MODELO DE PREVISÃO DE RIGIDEZ DE MISTURAS ASFÁLTICAS NO DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE PAVIMENTOS

**Carla Marília Cavalcante Alecrim** <sup>(1)</sup>

**Webert Brasil Cirilo da Silva** <sup>(2)</sup>

**Renan Santos Maia** <sup>(3)</sup>

**Gledson Silva Mesquita Junior** <sup>(4)</sup>

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN)

Universidade Federal do Ceará

**Beatriz Chagas Silva Gouveia** <sup>(5)</sup>

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT)

Departamento de Engenharia e Arquitetura

Universidade de Parma

**Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos** <sup>(6)</sup>

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Estrutural e Construção Civil (PEC)

Universidade Federal do Ceará

### RESUMO

O Módulo Dinâmico ( $|E^*|$ ) é um parâmetro de rigidez das misturas asfálticas utilizado no dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos. A partir de modelos matemáticos, associam-se reologia de ligante, volumetria e rigidez da mistura. Este artigo apresenta uma proposta de ferramenta para a obtenção de  $|E^*|$  a partir de um modelo de previsão atrelado à temperatura e à velocidade dos veículos na via. A análise realizada parte de um banco de dados de caracterização reológica de ligantes, de um modelo de previsão de  $|E^*|$ , da conversão velocidade-frequência, e da aplicação do princípio da superposição tempo-temperatura. Os parâmetros de rigidez resultantes foram empregados em um *software* de dimensionamento. Respostas de evolução dos principais defeitos (afundamento de trilha de roda e área trincada) foram obtidas de forma direta e simplificada, indicando a preponderância do fator temperatura no desempenho do pavimento avaliado.

### ABSTRACT

The Dynamic Modulus ( $|E^*|$ ) is an asphalt mixture stiffness parameter commonly used in mechanistic-empirical pavement design. Mathematical models can associate binders' rheology, and mixture volumetrics and stiffness. This paper presents a proposal of a tool for obtaining  $|E^*|$  from a predictive model and links it to temperature and vehicle speeds. The performed analysis required a database of binders' rheology, an  $|E^*|$  predictive model, a speed-frequency conversion method, and the application of time-temperature superposition principle. The resulting stiffness parameters entered as inputs in a pavement design software. Outputs of the evolution of the main pavements' distresses (rutting and cracking) can be obtained in a straightforward and simplified way, indicating the preponderance of the temperature factor in pavement performance.

### 1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A concepção de uma mistura asfáltica para aplicação em revestimentos de pavimentos passa pelo estudo das propriedades desse material. Essas características influenciam na resistência às solicitações mecânicas que o pavimento deve sofrer ao longo de sua vida de serviço. Dessa forma, a compreensão do comportamento desse material, bem como de seus constituintes é essencial para um projeto eficaz da mistura asfáltica. Além disso, deve ser proposto um dimensionamento adequado do pavimento para minimizar falhas na estrutura e prolongar sua durabilidade. O módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) é frequentemente o parâmetro de rigidez utilizado no dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos. Sua obtenção ocorre em laboratório, por meio de ensaio mecânico (ASTM D3497-79, 2003; AASHTO T 342, 2011; DNIT 416-ME, 2019). Tais protocolos demandam investimentos em aparatos técnicos e capacitação profissional. Assim, há esforços da comunidade técnico-científica brasileira para implementar esse teste na rotina do dimensionamento de pavimentos asfálticos. Todavia, na prática, o ônus relacionado à realização desses ensaios dificulta essa implementação.

Uma alternativa à realização dos procedimentos de ensaio mencionados é a elaboração de modelos empíricos. Esses devem permitir a obtenção de  $|E^*|$  a partir de variáveis provenientes de ensaios mais simples. Essa medida visa otimizar a caracterização dos materiais para pavimentação e facilitar a aplicação de métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento. Nesse sentido, é importante o levantamento de variáveis que se relacionem bem com a rigidez de um material. Dessa forma, parte-se da premissa fundamental de que a mistura asfáltica é composta por três elementos individuais básicos (ligante asfáltico, agregados e vazios). Análises estatísticas permitem a hierarquização e a combinação de elementos que exercem maior influência na rigidez da mistura. Assim, essas análises são capazes de compor as variáveis que melhor se adequem à concepção de um modelo de previsão de módulo dinâmico.

Algo importante a ser mencionado é que, em um pavimento asfáltico, destacam-se os defeitos de Afundamento de Trilha de Roda (ATR) e o trincamento por fadiga. Conforme Guimarães (2009), o ATR é provocado pela passagem do tráfego ao longo do tempo, além de fatores relacionados ao clima e aos materiais utilizados nas camadas do pavimento. Dessa forma, a deformação permanente pode prejudicar a drenagem no pavimento, o que favorece a ocorrência de hidroplanagem. Já o trincamento por fadiga ocorre, devido à repetição de solicitações de tráfego (Nascimento, 2015). A fadiga do material presente no revestimento asfáltico favorece o surgimento de trincas, diminuindo a resistência aos esforços oriundos do tráfego. Assim, isso pode ocasionar a exposição das camadas granulares.

Análises multiescala de misturas asfálticas permitem a percepção de que diversas propriedades podem ser estimadas por meio de parâmetros do próprio ligante, individualmente (Bari e Witczak, 2006; Sakhaeifar *et al.*, 2015). Por exemplo, propriedades que são afetadas pela temperatura tendem a ter correlação razoável com o ligante asfáltico. De fato, esse material é o componente principal da susceptibilidade térmica da mistura. Assim, é possível elaborar modelos matemáticos que proponham uma relação direta entre as propriedades reológicas do ligante e da mistura. Um dos objetivos deste trabalho inclui apresentar indicações de estruturação de ferramenta de previsão de rigidez de misturas asfálticas a partir das propriedades reológicas dos ligantes correspondentes. Outro objetivo é avaliar a aplicação dessas características nas respostas de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos. Tal estruturação se torna relevante à medida que existe uma necessidade de constante calibração e revalidação de modelos de previsão. Isso é importante para que seja estimulada a aplicação responsável dessas ferramentas.

## 2. MODELO DE PREVISÃO DE RIGIDEZ EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Gouveia *et al.* (2018) propuseram um método, no contexto brasileiro, para a obtenção do  $|E^*|$  da mistura por meio do módulo dinâmico em cisalhamento do ligante,  $|G^*|$ . A justificativa dos autores para a condução do estudo à época se fundamentou na então inexistência de norma nacional para obtenção de  $|E^*|$  (hoje existente, DNIT 416–ME, 2019) e na limitação da aplicação do módulo de resiliência como parâmetro de rigidez. Além disso, os autores salientam que modelos de previsão propostos pela literatura internacional foram calibrados a partir de misturas típicas diferentes para cada país. Assim, esses modelos foram desenvolvidos e/ou calibrados, no que se refere à origem dos ligantes, à mineralogia dos agregados, bem como aos métodos de dosagem. Portanto, se fazia necessário um modelo de previsão calibrado à realidade brasileira. Dentre os modelos internacionais abordados pelos autores, encontram-se: Bari e Witczak (2006), Christensen *et al.* (2003), Sakhaeifar *et al.* (2015) e Mateos e Soares (2015).

Os autores analisaram 24 misturas asfálticas nacionais, com variações de métodos e resultados de dosagem (teor de ligante), tipos de ligante (convencionais e modificados) e faixas granulométricas. Além disso, foram considerados os estados de origem dos materiais, e tipos de aplicação (campo/laboratório). Os ensaios de  $|E^*|$  foram realizados de acordo com a norma AASHTO T 342 (2011). Já os ligantes foram avaliados quando às propriedades reológicas na condição pós-envelhecimento no *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT), conforme a norma AASHTO T 315 (2012). Investigando a aderência dos resultados aos modelos consolidados na literatura, os autores observaram melhor adequação dos dados das misturas brasileiras ao modelo de Mateos e Soares (2015). Foi feita então a calibração com os dados experimentais para melhor representação das misturas tipicamente empregadas nos revestimentos asfálticos brasileiros, o que resultou em  $R^2$  de 0,96 em escala logarítmica. O modelo calibrado por Gouveia *et al.* (2018) é mostrado na Equação 1. Além de  $|G^*|$  do ligante, o modelo utiliza o volume de vazios ( $V_v$ ) da mistura asfáltica como parâmetro de entrada.

$$\log(|E^*|) = 2,259 + \frac{2,423}{1 + e^{(1,274 - 28,685V_v - 0,829 \log|G^*|)}} \quad (1)$$

Em que:  $|E^*|$ : módulo dinâmico axial da mistura asfáltica [MPa];  
 $V_v$ : volume de vazios da mistura asfáltica; e  
 $|G^*|$ : módulo dinâmico em cisalhamento do ligante [MPa].

### 3. MODELOS DE PREVISÃO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM MATERIAIS GRANULARES E MISTURAS ASFÁLTICA

#### 3.1 Modelo para materiais granulares

Guimarães (2009) propôs um modelo, no contexto brasileiro, para a previsão de deformação permanente em materiais granulares constituintes de pavimentos. Esse modelo foi obtido por meio de regressão não-linear múltipla e está representado na Equação 2. Os termos  $\Psi_1$ ,  $\Psi_2$ ,  $\Psi_3$  e  $\Psi_4$  são denominados de parâmetros de deformabilidade permanente.

$$\varepsilon_p(\%) = \Psi_1 \times \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\Psi_2} \times \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\Psi_3} \times N^{\Psi_4} \quad (2)$$

Em que:  $\varepsilon_p$ : deformação permanente específica [%];  
 $\Psi_1$ ,  $\Psi_2$ ,  $\Psi_3$  e  $\Psi_4$ : parâmetros de regressão;  
 $\sigma_3$ : tensão confinante [kgf/cm<sup>2</sup>];  
 $\sigma_d$ : tensão desvio [kgf/cm<sup>2</sup>];  
 $\rho_0$ : tensão de referência [valor usual adotado de 1 kgf/cm<sup>2</sup>]; e  
 $N$ : número de ciclos de aplicação de carga.

#### 3.2 Modelo para misturas asfálticas

Pesquisadores da *North Carolina State University* (NCSU), Estados Unidos, inseriram o modelo de deformação permanente para misturas asfálticas, denominado *Shift Model*, no programa *LVECD* (Eslaminia *et al.*, 2012; Choi e Kim, 2014). Isso permitiu a previsão de desempenho de pavimentos asfálticos quanto a essa falha. Esse modelo, representado pela Equação 3, utiliza os dados do protocolo do ensaio *Triaxial Stress Sweep* (TSS), proposto por Choi (2013). Além disso, a análise da Equação 3 é baseada em princípios viscoplásticos e está fundamentada em dois princípios de superposição. Dessa forma, são geradas duas funções de deslocamento, representadas pelas Equações 4 e 5.

$$\varepsilon_{vp} = \frac{\varepsilon_0 \times N_{red}}{(N_1 + N_{red})^\beta} \rightarrow \text{Curva de referência} \quad (3)$$

$$a_{\xi p} = p_1 \times \log(\xi_p) + p_2 \quad (4)$$

> Funções de deslocamento

$$a_{\sigma v} = d_1 \times \left(\frac{\sigma_v}{P_a}\right)^{d_2} + d_3 \quad (5)$$

Em que:

- $\varepsilon_{vp}$ : deformação permanente acumulada;
- $a_{\xi p}$ : função de deslocamento do tempo de carregamento reduzido;
- $a_{\sigma v}$ : função de deslocamento da tensão vertical;
- $\varepsilon_0$ ,  $N_1$  e  $\beta$ : coeficientes da curva de referência;
- $N_{red}$ : número de ciclos reduzido para um dado histórico de carga e igual ao número do ciclo físico (N) para o ensaio de referência;
- $\xi_p$ : tempo de carregamento reduzido [s];
- $p_1$  e  $p_2$ : parâmetros de regressão da função ajuste do tempo de carregamento reduzido;
- $\sigma_v$ : tensão vertical [MPa];
- $P_a$ : pressão atmosférica [valor usual adotado de 0,101 MPa]; e
- $d_1$ ,  $d_2$  e  $d_3$ : parâmetros de regressão das funções deslocamento.

#### 4. MODELO DE PREVISÃO DE VIDA DE FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Nascimento (2015) formulou um conjunto de equações a partir do modelo *Simplified-Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD) e do critério de ruptura baseado na taxa de variação média da energia de pseudo-deformação liberada ( $G^R$ ), a partir das quais é possível prever a vida de fadiga ( $N_f$ ) de misturas asfálticas (Equação 6). Essa expressão é analiticamente fechada, sendo todos os dados obtidos de ensaios mecânicos realizados na mistura asfáltica. A Equação 6 é determinada a partir das Equações 7, 8 e 9 para determinação de variáveis. Já as Equações 10 e 11 dizem respeito às curvas relacionadas à integridade do material e ao critério de falha, respectivamente, em ensaios de fadiga. O leitor é referido a Santos (2020) para uma discussão detalhada destas equações, incluindo uma didática análise de sensibilidade com respeito às mais relevantes variáveis.

$$N_f = \left( \frac{\delta}{Y \times \left(\frac{C_{12}}{p}\right) + 1} \right)^{\frac{1}{\Delta + 1 - \frac{C_{12}}{p}}} \quad (6)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \times (\varepsilon_{TA}^R)^2 \times C_{11} \times \left/ \frac{p \times (C_{11} \times C_{12})^\alpha \times (\varepsilon_{TA}^R)^{2\alpha} \times k_1}{f_R \times 2^\alpha} \right/^{1/p} \quad (7)$$

$$p = \alpha - \alpha \times C_{12} + 1 \quad (8)$$

$$\varepsilon_{TA}^R = \frac{1}{E_R} \times \left(\frac{\beta + 1}{2}\right) \times [(\varepsilon_{0,pp})_i \times |E^*|_{LVE}] \quad (9)$$

$$C(S) = 1 - C_{11} \times S^{C_{12}} \quad (10)$$

$$G^R = Y \times (N_f)^{\Delta} \quad (11)$$

Em que:

$N_f$ : número de ciclos até a falha;  $\varepsilon_{TA}^R$ : amplitude da pseudo-deformação;  $C(S)$ : integridade do material;  $G^R$ : taxa de variação média da energia de pseudo-deformação liberada (por ciclo) durante todo o ensaio;  $\alpha$ : taxa de evolução do dano;  $k_I$ : fator de forma do pulso de carga;  $S$ : parâmetro de dano;  $C_{I1}$  e  $C_{I2}$ : coeficientes da curva  $C \times S$ ;  $f_R$ : frequência reduzida [Hz];  $Y$ : coeficientes da equação referente ao critério de ruptura  $G^R \times N_f$ ;  $\Delta$ : expoente da equação referente ao critério de ruptura  $G^R \times N_f$ ;  $\varepsilon_{0,pp}$ : amplitude de deformação pico a pico;  $\beta$ : parcela do ciclo em que ocorre tensão de tração [valor usual adotado de -0,08];  $E_R$ : módulo de referência, adotado como 1,0 para situações em que há o regime viscoelástico-linear estabelecido;  $e/E^*/LVE$ : módulo dinâmico viscoelástico linear nas condições de temperatura e frequência em questão [MPa].

## 5. APLICAÇÃO DO MODELO DE GOUVEIA *ET AL.* (2018)

### 5.1. Rigidez das misturas a partir dos ligantes asfálticos correspondentes

A aplicação do modelo de previsão da rigidez foi realizada a partir de uma planilha. No caso, o banco de dados inicial foi alimentado com os dados de materiais e ensaios realizados por Gouveia (2016). A ferramenta final demanda que o operador defina uma velocidade de tráfego e uma temperatura média à qual a estrutura será submetida. Dentre as possibilidades oriundas do banco de dados, selecionam-se o ligante a ser utilizado e a volumetria a ser atingida, em termos de Vv. Esses fatores de entrada devem ser suficientes para fornecer um valor esperado para o módulo dinâmico da mistura nas condições selecionadas.

#### 5.1.1. Definição das constantes relativas à mistura e ao ligante

A estruturação de um banco de dados de misturas e de ligantes asfálticos a serem selecionados é o passo inicial do procedimento. Assim, são relacionadas, de forma direta, as constantes de Arrhenius (C) relativas aos materiais (misturas e ligantes). Neste passo inicial, o operador deve definir a temperatura máxima da via, a velocidade máxima projetada, assim como o Vv projetado da mistura. No presente estudo foi escolhido, do trabalho de Gouveia (2016), o ligante CAP 50/70 (sem aditivo), cuja constante de Arrhenius é igual a 3264,2K. Já para a mistura foi adotado o material intitulado “Installe 1”, o qual foi utilizado em trecho experimental, cuja valor de C é de 11205,8K e o Vv é de 4%.

#### 5.1.2. Obtenção da curva mestra de $|G^*|$ dos ligantes asfálticos

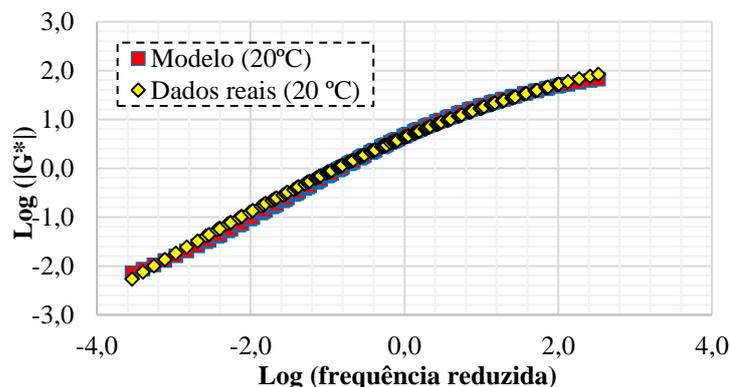
Resultados de ensaios de  $|G^*|$  do ligante devem ser inseridos na ferramenta à medida que novos dados estejam disponíveis. Adotou-se um padrão de trabalho com temperatura de referência de 20°C, usada por Gouveia (2016), para validar o modelo posteriormente corrigido em Gouveia *et al.* (2018). Quaisquer dados podem ser parametrizados à temperatura de referência por meio do Princípio de Superposição Tempo-Temperatura (PSTT). A curva mestra de  $|G^*|$  pode ser construída por meio de uma otimização da Equação 12 (sigmoidal).

$$\log(|G^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{[\beta + \gamma \log(|t_r|)]}} \quad (12)$$

Em que:

$|G^*|$ : módulo dinâmico em cisalhamento do ligante [MPa];  $t_r$ : tempo de carregamento na temperatura de referência [s];  $\delta$ : valor mínimo do módulo dinâmico [MPa];  $\delta + \alpha$ : valor máximo do módulo dinâmico [MPa];  $\beta$  e  $\gamma$ : parâmetros da curva de ajuste da função sigmoidal.

A Figura 1 apresenta um exemplo de curva mestra obtida pelo modelo sigmoidal sobreposto aos dados originais de ensaio e transladados para a temperatura de 20°C. Dessa forma, a Equação 13 consiste no modelo obtido para representar os dados de  $|G^*|$  do ligante escolhido. Nesse caso,  $R^2$  foi igual a 0,997, o que indica satisfatória aderência do modelo aos dados reais.

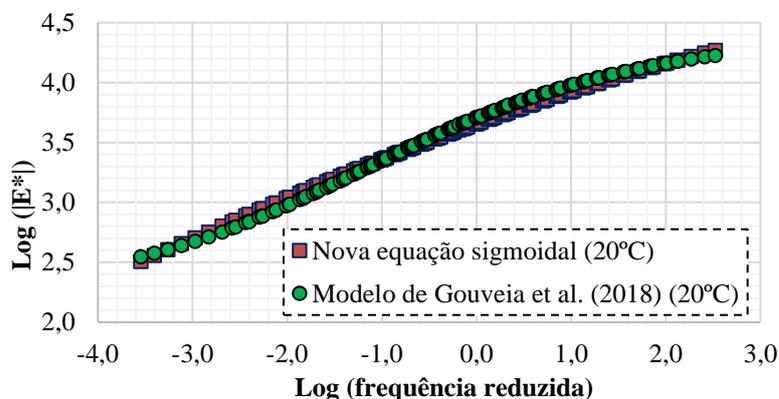


**Figura 1:** Ajuste dos dados experimentais à função sigmoidal (exemplo do CAP 50-70)

$$\log(|G^*|) = -3,20 + \frac{5,40}{1 + e^{[-0,92 + 0,66 \log(|t_r|)]}} \quad (13)$$

### 5.1.3. Previsão do módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) e curvas mestras da mistura asfáltica

Os dados de entrada preenchidos pelo operador recuperam um valor de  $|G^*|$  correspondente do ligante selecionado. Posteriormente,  $|G^*|$  e  $V_v$  são inseridos no modelo de Gouveia *et al.* (2018) (Equação 1). Assim, uma curva de  $|E^*|$  é construída na mesma temperatura de referência (20°C) e na mesma base de frequências da curva mestra de  $|G^*|$ . Uma nova expressão sigmoidal no formato da Equação 12 foi otimizada (Equação 14) para simular o comportamento de  $|E^*|$ , visto que os coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  e  $\gamma$  da mistura são necessários como dados de entrada no *software* de dimensionamento na sequência (aqui foi usado o CAP 3D-D). Para a mistura,  $R^2$  foi igual a 0,995, indicando aderência entre os dois modelos. As duas curvas constam na Figura 2.



**Figura 2:** Curva mestra de  $|E^*|$  obtida a partir da aplicação do modelo de Gouveia *et al.* (2018) (CAP 50-70, mistura com  $V_v$  de 4%)

$$\log(|E^*|) = -0,10 + \frac{5,30}{1 + e^{[-0,89 + 0,26 \log(|t_r|)]}} \quad (14)$$

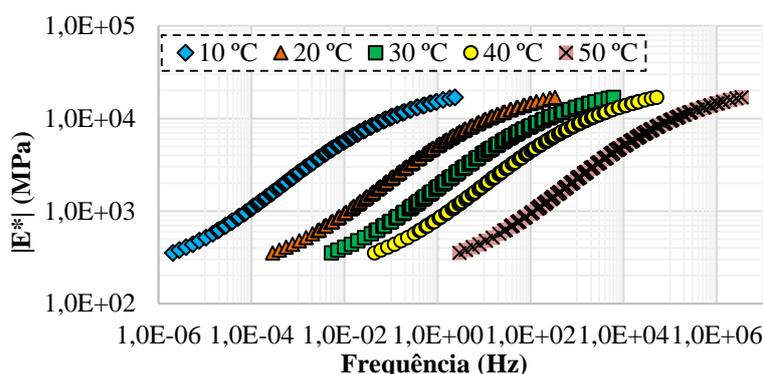
Obtida uma curva mestra de  $|E^*|$  a partir de dados de  $|G^*|$  e  $V_v$  (4%), dispostos em temperatura de referência (em geral, 20°C, ou 293,15K) e base de frequências, o PSTT pode ser aplicado por meio do *shift factor*. O PSTT pode ser compreendido a partir da Figura 3. Observa-se que a rigidez da mistura asfáltica a 50°C e 100Hz é equivalente à rigidez a 20°C e 0,01Hz. Em resumo, o aumento da temperatura reduz a rigidez e o aumento da frequência a aumenta. O *shift factor* é o parâmetro matemático utilizado para, por meio de translações das curvas na direção horizontal, proporcionar a aplicação do PSTT (Equações 15 e 16).

$$\log|\alpha_T| = C \times \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad (15)$$

$$\text{Frequência } (T_R) = \text{Frequência } (T) \times \alpha_T \quad (16)$$

Em que:

$\alpha_T$ : *shift factor* na temperatura  $T$ ;  $C$ : constante de Arrhenius de ajuste da curva;  $T$ : temperatura de obtenção dos dados [K];  $T_R$ : temperatura de referência para construção da curva [K].



**Figura 3:** Resultados de rigidez, em função da frequência, de uma mesma mistura asfáltica em diferentes temperaturas

#### 5.1.4. Determinação da frequência de carregamento a partir da velocidade dos veículos

Na ferramenta proposta, a frequência foi definida a partir da velocidade máxima da via. Foram utilizados dados propostos por Albano (1998) para obtenção da área de contato pneu-pavimento, sendo adotada a carga de 82kN para o eixo padrão e uma área de contato de 400,75cm<sup>2</sup> para um pneu. Considerando a aproximação dessa área com uma circunferência, o raio de contato é igual a 11,29cm aproximadamente. Assumindo-se um efeito da carga limitado a uma distância total de 12 vezes o raio de contato (135,53cm), com a velocidade introduzida pelo operador, calcula-se o tempo necessário para percorrer tal espaço. Com o inverso desse período (em s), tem-se a frequência (em Hz), que deve ser utilizada nos modelos construídos.

#### 5.1.5. Obtenção do valor de $|E^*|$

Uma vez consolidado um banco de dados para a caracterização de rigidez de diferentes ligantes asfálticos  $|G^*|$ , pode-se prever o  $|E^*|$  das misturas a partir de valores de temperatura e velocidade. A seguir estão listados dois procedimentos a serem seguidos para o cálculo do valor de  $|E^*|$ .

Etapa 1 → Determinada a frequência (item 5.1.4), sabe-se que essa variável está relacionada a uma via com certa temperatura atuante ( $T$ ). Dessa forma, utiliza-se a Equação 15 para calcular o *shift factor*, sabendo que a temperatura de referência ( $T_R$ ) é 20°C. Utiliza-se a constante de

Arrhenius referente ao ligante (3264,2K). Feito isso, por meio da Equação 16, a frequência é transladada para a curva mestra de  $|G^*|$  a 20°C;

Etapa 2 → Calculada a nova frequência (em Hz), denominada frequência reduzida, inverte-se esse valor e tem-se o tempo de carregamento (em s). Assim, a Equação 13 deve ser utilizada para a determinação do  $|G^*|$ . Com isso, por meio da Equação 1, com  $V_v$  de 4%, é obtido o  $|E^*|$  correspondente.

## 5.2. Aplicação no dimensionamento mecânico-empírico

O modelo de rigidez estudado foi analisado, na sequência, em termos de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Optou-se por utilizar o *software* CAP 3D-D (Santiago *et al.*, 2018), no qual a rigidez é considerada a partir da inserção dos parâmetros relativos à curva sigmoidal de  $|E^*|$ . A respeito disso, destaca-se que o *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) recomenda a utilização de  $|E^*|$  como parâmetro de rigidez na caracterização de misturas asfálticas para fins de dimensionamento (NCHRP, 2004).

Conforme o padrão do programa, são inseridas as constantes  $b$ ,  $d$ ,  $a$ ,  $g$  ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\gamma$  respectivamente) da curva sigmoidal de  $|E^*|$ . O PSTT é descrito matematicamente por meio de uma função polinomial de 2º grau (parábola) que relaciona o *shift factor* com a temperatura (Figura 4). A Equação 17 mostra essa relação. Os parâmetros  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  são também dados de entrada do programa.

$$\log(\alpha_T) = \alpha_1 T^2 + \alpha_2 T + \alpha_3 \quad (17)$$

Em que:

$\alpha_T$ : *shift factor* na temperatura  $T$ ;  $T$ : temperatura de obtenção dos dados [°C];  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$ : coeficientes para a determinação do *shift factor*.

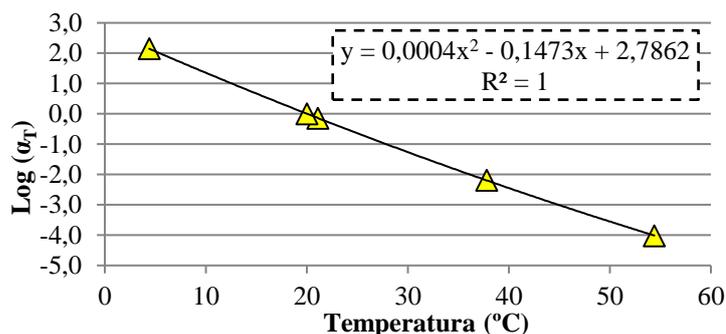


Figura 4: Parábola de  $\log(\alpha_T)$  versus temperatura

## 6. APLICAÇÃO PRÁTICA

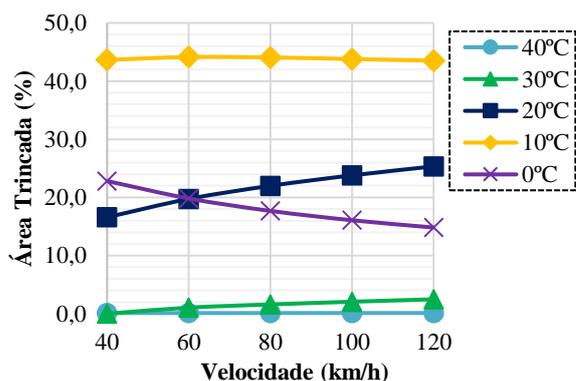
Com relação aos parâmetros relacionados à rigidez, deformação permanente e fadiga em misturas asfálticas, a Tabela 1 apresenta as premissas assumidas nas análises feitas no CAP 3D-D. É importante destacar que, no que se refere à rigidez, são exigidos parâmetros presentes nas Equações 14 e 17. A respeito da deformação permanente, são necessárias as Equações 2, 3, 4 e 5. Com relação à fadiga, são importantes as Equações 6, 7, 8, 9, 10 e 11. Os dados referentes à fadiga foram provenientes de misturas ensaiadas pelo corpo técnico do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES), da Petrobras. Assim, foi escolhida a mistura M5, a qual apresentou a maior Porcentagem de Área Trincada por fadiga (%AT) na pesquisa de Santos (2020). Para a análise de deformação permanente, recorreu-se

aos dados de Bastos *et al.* (2018), de onde foi escolhida a mistura intitulada “*Road Concession Company*” (CCR), pois esse material foi utilizado na construção de uma via, sendo similar à mistura “*Installe 1*” deste artigo. Ressalta-se a necessidade de atentar para o sinal dos parâmetros da sigmoideal, que da forma como foi implementada no CAP3D-D, difere um pouco da forma apresentada por Gouveia *et al.* (2018). Assim, é preciso se certificar da compatibilização matemática entre as duas expressões.

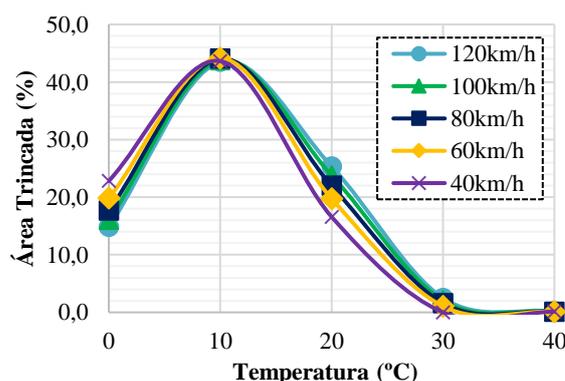
**Tabela 1:** Premissas de análise do comportamento mecânico

Premissas de projeto							
Período de serviço (anos)		10					
Tráfego do Ano Inicial (número N)		1.000.000					
Taxa de crescimento exponencial anual (%)		2					
Tráfego Total (número N)		10.949.845					
Revestimento asfáltico							
Modelo constitutivo				Viscoelástico linear			
Espessura (cm)				8,00			
Poisson (v)				0,30			
Parâmetros de rigidez							
$\delta$ (a)	$\alpha$ (b)	$\beta$ (d)	$\gamma$ (g)	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	
-0,10	5,30	0,89	0,26	0,0004	-0,1473	2,7862	
Parâmetros de deformação permanente							
$\epsilon_0$	$\beta$ (beta)	p1	p2	d1	d2	N1	Tref (°C)
0,055	0,42	1,386	-0,677	0,10	1,10	0,607	47
Parâmetros de fadiga							
Y	$\Delta$ (delta)	$\alpha$ (alfa)	$\beta$ (beta)	C11		C12	
5.064.581	-1,36	2,71	-0,08	0,00007		0,81166	
Camadas subjacentes							
				Base	Sub-base	Subleito	
Modelo constitutivo				Elástico linear	Elástico linear	Elástico linear	
Espessura (cm)				15	15	$\infty$	
N				0,35	0,35	0,40	
Módulo de elasticidade (E) (MPa)				500	300	200	
Parâmetros de deformação permanente							
				$\Psi_1$ (k1)	0,593	0,593	0,593
				$\Psi_2$ (k2)	-0,198	-0,198	-0,198
				$\Psi_3$ (k3)	1,332	1,332	1,332
				$\Psi_4$ (k4)	0,042	0,042	0,042

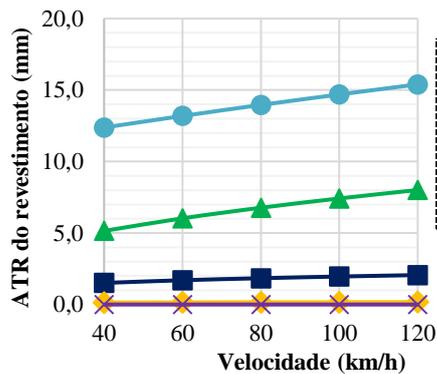
Concluídas as análises no *software*, na Figura 5, estão presentes os resultados obtidos, com relação à %AT e ao ATR. Foi verificada a tendência de variação da %AT e do ATR, com relação à temperatura da mistura asfáltica (0°C a 40°C) e à velocidade do tráfego atuante em uma pista (40km/h a 120km/h).



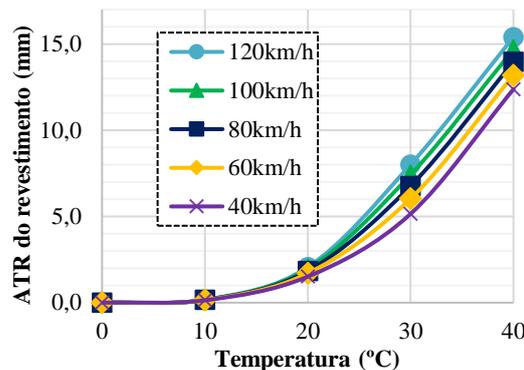
(a) %AT do revestimento *versus* velocidade



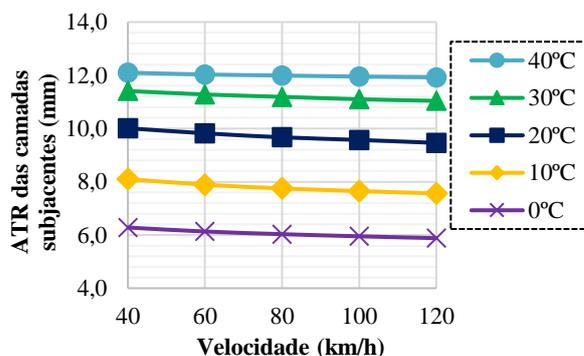
(b) %AT do revestimento *versus* temperatura



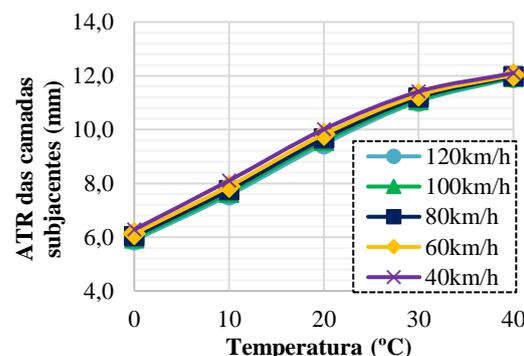
(c) ATR do revestimento *versus* velocidade



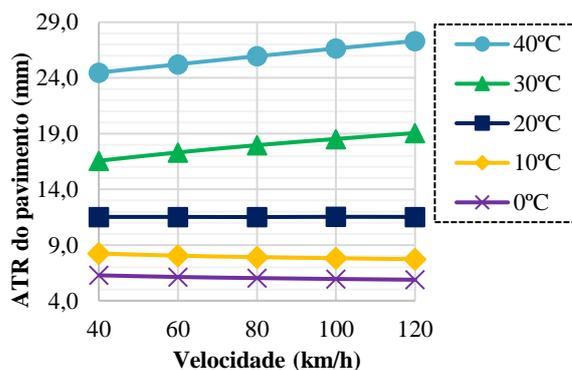
(d) ATR do revestimento *versus* temperatura



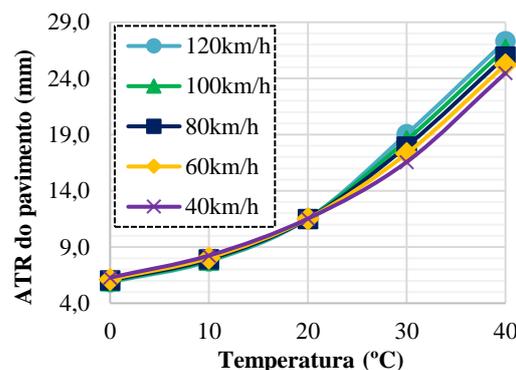
(e) ATR das camadas subjacentes (base, sub-base e subleito) *versus* velocidade



(f) ATR das camadas subjacentes (base, sub-base e subleito) *versus* temperatura



(g) ATR do pavimento *versus* velocidade



(h) ATR do pavimento *versus* temperatura

**Figura 5:** Parâmetros de desempenho em função de diferentes valores de velocidade e temperatura

No que tange à fadiga, em termos de %AT, observou-se que os resultados obtidos para esse defeito quando a temperatura do ar está a 10°C foram os maiores (da ordem de 44%) em relação aos obtidos para outras temperaturas, inclusive a de 0°C. Com relação a esse pico a 10°C, pode-se argumentar que o trincamento por fadiga é algo usual em temperaturas intermediárias, como 10°C. Nesse caso, o aumento da rigidez do material pode torná-lo menos resistente aos esforços decorrentes da fadiga. No que tange à deformação permanente, atestou-se uma elevação do ATR no revestimento asfáltico e no pavimento como um todo com a elevação da temperatura ambiente. Percebe-se que a ocorrência de ATR no revestimento aparece à 10°C e aumenta abruptamente em temperaturas superiores a 20°C, enquanto o pavimento apresenta deformações a temperaturas mais baixas. Isso indica, por exemplo, que a mistura asfáltica possui maior

sensibilidade a variações de temperatura em comparação aos materiais das outras camadas, como esperado, visto que esse material é termo-suscetível. Para a faixa de velocidades estudada, 40km/h a 120km/h, os defeitos analisados praticamente não variaram, o que é percebido pelas curvas praticamente horizontais. Essa constatação mostra a preponderância do fator temperatura no desempenho do pavimento-tipo avaliado.

No que tange à %AT, a investigação dos parâmetros do modelo S-VECD é importante. De acordo com Santos (2020), parâmetros, como  $C_{12}$  da curva  $C \times S$  (Equação 10) e  $\Delta$  da curva  $G^R \times N_f$  (Equação 11) podem contribuir matematicamente para o elevado valor da vida de fadiga em uma mistura. Também pode-se comentar que, com relação ao parâmetro  $C_{11}$ , ao comparar com as seis misturas testadas por Santos (2020), o valor de 0,00007 foi o menor. Assim, pode ser formulada uma hipótese de que, quanto menor o valor de  $C_{11}$ , maior a vida de fadiga da mistura. Outra discussão diz respeito ao parâmetro  $\beta$  (-0,08). No caso, são necessários estudos mais específicos para avaliar o impacto de sua variação nos resultados de %AT. Também é importante que seja determinado um novo valor usual de  $\beta$  que aproxime mais as simulações no ambiente em campo, tornando as análises mais fidedignas (Santos, 2020).

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os objetivos iniciais propostos, pode-se afirmar que se atingiu a expectativa de proporcionar uma maior automatização do processo de obtenção de parâmetros de rigidez de misturas asfálticas. Para isso, foram utilizados valores de temperatura e de velocidade (convertida em frequência/período). Assim, é possível os dados referentes ao  $|G^*|$  do ligante serem convertidos em  $|E^*|$  da mistura, desde que o banco de dados seja continuamente atualizado com dados de ensaios de rigidez. Cabe salientar que os valores extremos de frequência/temperatura apresentam, pela análise visual das funções sigmoidais, uma maior dispersão em relação à curva experimental original de ligantes asfálticos.

No que refere à %AT, a mesma ocorre com maior intensidade a 10°C, cabendo a investigação do motivo de menores %AT serem encontradas a temperaturas ainda mais baixas. Com relação ao ATR, como esperado, a mistura asfáltica possui uma maior sensibilidade à variação de temperatura se comparada aos materiais granulares. Além disso, a influência da velocidade máxima da via na evolução desses defeitos foi praticamente insignificante se comparada à da temperatura. Finalmente, o estudo de caso apresentado permite verificar a importância da elaboração de um banco de dados robusto. Assim, podem ser inseridos parâmetros relacionados à rigidez, além de premissas razoáveis em termos de deformação permanente e fadiga. Isso pode contribuir, de forma objetiva, na previsão do comportamento mecânico da mistura que se deseja aplicar em campo.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Capes, ao CNPq e à Funcap pelo auxílio financeiro fornecido. Os autores também agradecem ao Centro de Tecnologia em Asfalto Norte/Nordeste e ao professor Jorge Barbosa Soares, no apoio dado ao longo da disciplina de Mecânica dos Pavimentos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Um agradecimento especial ao engenheiro da Aeronáutica Anthony Belo Vasconcelos Santos pelo auxílio às planilhas de análise de defeitos relacionados à fadiga.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2011) *T 342 - Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)*. Washington-DC, EUA.
- AASHTO (2012) *T 315 - Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*. Washington-DC, EUA.

- Albano, J. F. (1998) *Efeitos da Variação de Carga por Eixo, Pressão de Inflação e Tipo de Pneu na Resposta Elástica de um Pavimento*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ASTM (2003) *D3497-79 - Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures (Withdrawn 2009)*. West Conshohocken-PA, EUA.
- Bari, J.; Witzak, M. W. (2006) Development of a new revised version of the Witzak E\* predictive model for hot mix asphalt mixtures (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists - Proceedings of the Technical Sessions*, v. 75, p. 381-423.
- Bastos, J. B. S.; Silva, S. A. T.; Soares, J. B.; Nascimento, L. A. H.; Kim, Y. R. (2018) Triaxial stress sweep test protocol considerations for permanent deformation characterisation of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, v. 19, n. 2, p. 431-444. DOI: 10.1080/14680629.2016.1261729.
- Choi, Y. T. (2013) *Development of a Mechanistic Prediction Model and Test Protocol for the Permanent Deformation of Asphalt Concrete*. 238 f. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, North Carolina State University, Raleigh.
- Choi, Y. T.; Kim, Y. R. (2014) Implementation and verification of a mechanistic permanent deformation model (shift model) to predict rut depths of asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, v. 15, n. sup1, p. 195-218. DOI: 10.1080/14680629.2014.927085.
- Christensen Jr, D. W.; Pellinen, T.; Bonaquist, R. F. (2003) Hirsch model for estimating the modulus of asphalt concrete. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 72, p. 97-121.
- DNIT (2019) *ME 416 – Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio*, Rio de Janeiro.
- Eslaminia, M.; Thirunavukkarasu, S.; Guddati, M. N.; Kim, Y. R. (2012) Accelerated pavement performance modeling using layered viscoelastic analysis. *Proceedings of the 7th International RILEM Conference on Cracking in Pavements*, Delft, p. 497-506.
- Guimarães, A. C. R. (2009) *Um Método Mecânico-Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos*. 367 f. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Gouveia, B. C. S. (2016) *Métodos de previsão e determinação de módulo dinâmico de misturas asfálticas aplicadas em rodovias brasileiras*. 99 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Gouveia, B. C. S.; Soares, J. B.; Aragão, F. T. S.; Specht, L. P. (2018) Previsão do módulo dinâmico de misturas asfálticas Brasileiras. *Revista Transportes*, v. 26, n. 4. DOI:10.14295/transportes.v26i4.1388.
- Mateos, A.; Soares, J. B. (2015) Validation of a dynamic modulus predictive equation on the basis of Spanish asphalt concrete mixtures. *Materiales de Construcción*, v. 65, n. 317, p. 047. DOI: 10.3989/mc.2015.01114.
- Nascimento, L. A. H. (2015) *Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil*. 336 f. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, North Carolina State University, Raleigh.
- NCHRP (2004) *Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and Rehabilitated Pavement Structures. Final Report. Part 3: Design Analysis. Chapter 3: Design of new and reconstructed flexible pavement*, EUA.
- Sakhaeifar, M. S.; Kim, Y. R.; Kabir, P. (2015) New predictive models for the dynamic modulus of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, v. 76, p. 221-231. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.011.
- Santiago, L. S.; Silva, S. A. T.; Soares, J. B. (2018) Determinação do dano em pavimentos asfálticos por meio da combinação do modelo S-VECD com análises elásticas. *Revista Transportes*, v. 26, n. 2. DOI: 10.14295/transportes.v26i2.1446.
- Santos, A. B. V. (2020) *Contribuições para um Método Mecânico-Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos: Influência da Temperatura e da Velocidade de Tráfego na Previsão de Área Trincada*. 166 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

(1) Carla Marília Cavalcante Alecrim (marilia@det.ufc.br)

(2) Webert Brasil Cirilo da Silva (webertcirilo@hotmail.com)

(3) Renan Santos Maia (renanmaia@det.ufc.br)

(4) Gledson Silva Mesquita Junior (gledson@det.ufc.br)

(5) Beatriz Chagas Silva Gouveia (biacs@gmail.com)

(6) Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos (babadopulos@ufc.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará

Campus do Pici – Bloco 703 – 60455-760 Tel: +55 (85) 3366-9488

Fortaleza, Ceará