

AVALIAÇÃO E PROPOSTA DE AJUSTE DO MODELO DE CORREÇÃO DE DEFLEXÕES DE AMORIM (2013) PARA MISTURAS ASFÁLTICAS BRASILEIRAS

RODOLFO PAZ OLIVEIRA DOS SANTOS¹; **PRISCILA MILECH THEISEN²**;
KLAUS MACHADO THEISEN³

¹*Universidade Federal de Pelotas – rodolfo.p.o.santos@gmail.com*

²*Universidade Federal do Rio Grande do Sul – priscila.milech@gmail.com*

³*Universidade Federal de Pelotas – theisenkm@yahoo.com.br*

1. INTRODUÇÃO

Segundo LOGANATHAN *et al.* (2019), a avaliação estrutural de pavimentos flexíveis fundamenta-se, em grande parte, na medição das deflexões superficiais, parâmetro que reflete a capacidade de suporte do conjunto pavimento–fundação. Entre os métodos empregados, destaca-se o ensaio com deflectômetro de impacto (FWD), que permite determinar a bacia de deflexão resultante da aplicação de uma carga impulsiva. Contudo, a deflexão das misturas betuminosas é altamente sensível às variações da temperatura, o que dificulta a comparação direta de resultados obtidos em diferentes condições climáticas de ensaio.

Nesse contexto, a correção das deflexões em função da temperatura do revestimento asfáltico constitui procedimento fundamental para a análise estrutural, uma vez que as propriedades viscoelásticas dos materiais betuminosos sofrem alterações significativas com as variações térmicas. Diversos modelos foram propostos para essa finalidade, entre os quais se destaca o de AMORIM (2013). A autora desenvolveu equações de correção a partir de ensaios laboratoriais em diferentes misturas asfálticas, de avaliações *in situ* realizadas em quatro pavimentos localizados nas proximidades de Guimarães, Portugal, e de modelagem numérica conduzida por meio do software JPAv2.1. Com base nesse conjunto de dados, estabeleceu-se a razão de deflexões (DR), definido como a razão entre a deflexão de uma mistura a uma dada temperatura e a deflexão correspondente à condição de referência de 30 °C. Essa formulação permite comparar pavimentos e misturas distintas, independentemente da temperatura em que os ensaios foram conduzidos.

Entretanto, a aplicação de modelos desenvolvidos em contextos europeus pode não refletir adequadamente as misturas betuminosas utilizadas no Brasil, dadas as diferenças de ligantes, granulometrias e condições climáticas. Diante disso, este trabalho propõe validar o modelo de AMORIM (2013) e, no caso do mesmo produzir maus resultados, propor um método alternativo de correção, baseado em bacias deflectométricas geradas empregando-se as curvas mestras obtidas experimentalmente para misturas brasileiras obtidas de BRUXEL (2015).

Assim, o objetivo central deste estudo é avaliar a aplicabilidade do modelo de AMORIM (2013) no contexto brasileiro e, se necessário, propor um modelo calibrado que represente de forma mais fiel as condições locais.

2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da análise, foram empregados os resultados de ensaios laboratoriais apresentados por BRUXEL (2015), os quais possibilitaram o ajuste de curvas mestras para misturas asfálticas com quatro ligantes distintos: CAP 50/70, CAP 60/85, CAP TLA e CAP TLAFlex. A utilização das curvas mestras das misturas asfálticas permitiu a obtenção do módulo dinâmico em temperaturas

compreendidas entre -10 °C e 30 °C, em intervalos regulares de 5 °C, utilizados como módulos de resiliência do revestimento nas análises.

Com base nesses dados, realizaram-se simulações no software AEMC, disponibilizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), visando gerar deflexões virtuais equivalentes às obtidas com o equipamento FWD. As simulações foram conduzidas para os intervalos de temperatura especificados e em diferentes distâncias longitudinais em relação ao centro do prato de carregamento (0 cm, 20 cm, 30 cm, 45 cm, 60 cm, 90 cm e 120 cm), correspondentes às posições usuais dos geofones em ensaios reais. Adotaram-se coeficientes de Poisson de 0,30 para o revestimento, 0,35 para a base, 0,35 para a sub-base e 0,40 para o subleito. As camadas foram consideradas em condição de não aderência e o carregamento aplicado foi o de um eixo rodoviário padrão. Inicialmente, as deflexões foram calculadas para a estrutura composta por 0,10 m de revestimento, 0,20 m de base e 0,30 m de sub-base.

Com as deflexões assim obtidas, calculou-se o DR das misturas estudadas por BRUXEL (2015), definido como a razão entre a deflexão em uma dada temperatura e a deflexão correspondente a 30 °C. Da mesma forma, foi possível determinar a razão de deflexões segundo o modelo de AMORIM (2013).

O modelo de AMORIM (2013) contempla pavimentos com espessura de revestimento entre 10 cm e 40 cm, módulos de resiliência do subleito de 20 MPa a 120 MPa, temperaturas variando de -10 °C a 30 °C, além de uma camada granular de base de 20 cm com módulo de resiliência equivalente ao dobro do subleito. O posicionamento dos sensores é considerado entre 0 m e 2,10 m em relação ao centro do prato de carregamento. A razão de deflexões é definida pela Equação 1, em que, em que e_1 é a espessura do revestimento (m); E_4 o módulo de resiliência do subleito (MPa); T a temperatura (°C); x a posição do sensor de medida de deflexão (m); X_1, X_2, X_3 e X_4 (X_i para i entre 1 e 4) como e_1, E_4, T e x , respectivamente; e $\beta_{0,i}, \beta_{1,i}$ e $\beta_{2,i}$ constantes, conforme tabela 1:

$$DR(e_1, E_4, T, x) = \frac{D(e_1, E_4, 30^\circ\text{C}, x)}{D(e_1, E_4, T, x)} = \prod_{i=1}^4 (\beta_{0,i} + \beta_{1,i} * X_i + \beta_{2,i} * X_i^2) \quad (1)$$

Tabela 1. Constantes do modelo para razões de deflexão. AMORIM (2013)

i	$\beta_{0,i}$	$\beta_{1,i}$	$\beta_{2,i}$
1	0,00953	-0,00855	-0,00166
2	0,00397	-1,17	366
3	0,0034	0,272	-23,2
4	0,0151	-0,065	0,151

Com as razões de deflexão calculados, foi possível avaliar a proximidade entre os valores obtidos diretamente a partir dos dados de BRUXEL (2015) e das simulações no software AEMC, que foram denominados “DRs reais”, com os valores obtidos segundo método de AMORIM (2013).

As análises contemplaram espessuras de revestimento variando de 10 cm a 40 cm, em intervalos de 5 cm, e módulos de resiliência de subleito entre 20 MPa e 120 MPa. Cada condição analisada foi simulada individualmente pelos dois métodos, resultando em um total de 2097 comparações de valores.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A comparação entre os dois métodos foi realizada considerando diferentes cenários possíveis dentro das condições estabelecidas pelo modelo de AMORIM

(2013). Para cada mistura asfáltica estudada por BRUXEL (2015), foram calculados os “DRs reais”, obtidos a partir das curvas mestras, e os “DRs segundo AMORIM (2013)”, estimados pelas equações propostas pela autora.

Os valores de DR obtidos pelos dois métodos foram avaliados de forma gráfica e matemática. Graficamente, verificou-se uma dispersão significativa entre os resultados quando representados em diagramas de dispersão com reta de igualdade. Como exemplo, os Gráficos 1 e 2 ilustram a comparação para a mistura CAP 60/85, considerando pavimentos com espessura de 10 cm e 40 cm, ambos sobre subleito com módulo de resiliência de 120 MPa:

Gráfico 1. Comparação de DRs, CAP 60/85, pavimento com espessura de 10 cm e subleito com módulo de resiliência de 120 MPa

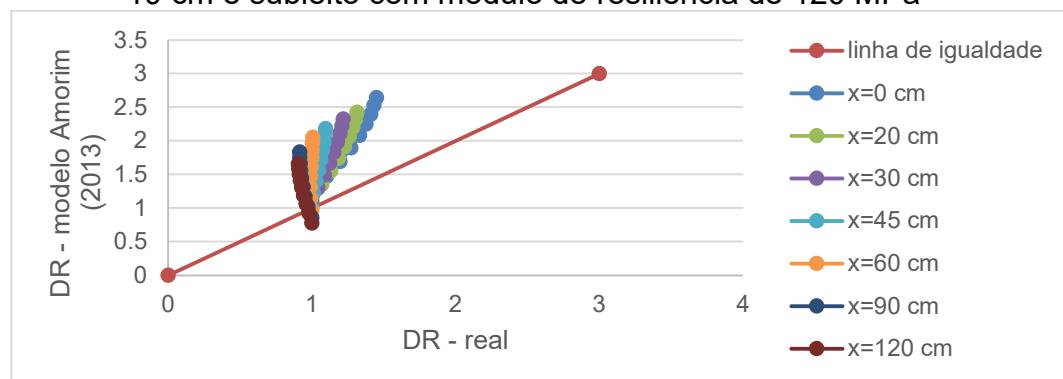
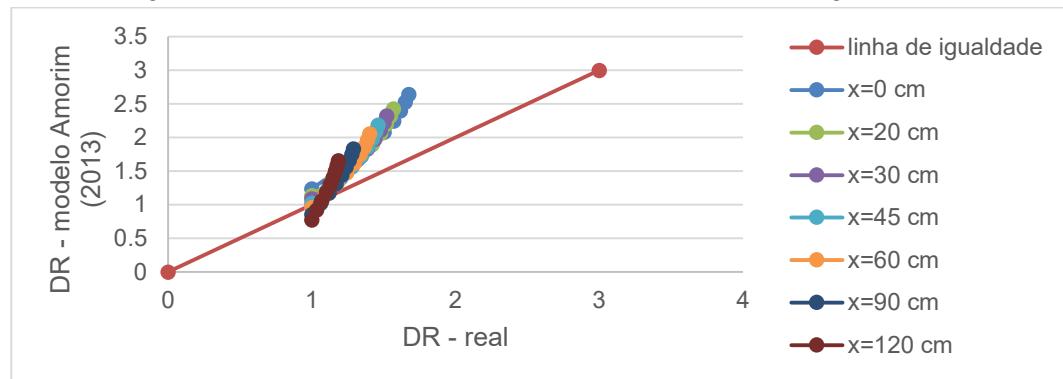


Gráfico 2. Comparação de DRs, CAP 60/85, pavimento com espessura de 40 cm e subleito com módulo de resiliência de 120 MPa



Do ponto de vista matemático, calculou-se o Erro Percentual Médio (EPM) entre os valores obtidos pelo modelo de AMORIM (2013) e os “DRs reais”. O maior erro individual foi de 57,71%, verificado para a mistura CAP TLA em pavimento com 40 cm de espessura de revestimento e subleito de 120 MPa. Nessa condição, o DR real foi de 1,641812, enquanto o valor estimado pelo modelo atingiu 3,88303. O EPM global foi de 38,74%, valor elevado que indica a baixa aplicabilidade do modelo de AMORIM (2013) às misturas brasileiras sem ajustes adicionais.

Embora o erro percentual não tenha apresentado relação clara com a variação da temperatura ou da espessura de revestimento, verificou-se graficamente um achatamento progressivo da razão entre “DR real” e DR por AMORIM (2013) com o aumento da espessura do revestimento. Esse comportamento foi recorrente em todas as misturas, sugerindo que a discrepância esteja associada à inadequação dos coeficientes originais do modelo às características das misturas brasileiras.

Diante disso, procedeu-se ao ajuste das constantes β do modelo AMORIM (2013) com o auxílio da ferramenta de inteligência artificial ChatGPT Plus 4.1, que analisou numericamente as 2.079 combinações de variáveis e forneceu um novo conjunto de coeficientes calibrados (Tabela 2).

Tabela 2. Constantes do modelo para razões de deflexão ajustadas.

i	$\beta_{0,i}$	$\beta_{1,i}$	$\beta_{2,i}$
1	-2,09624954	1,8326716	0,94232772
2	-0,0000001119	-0,0014416576	1,1294163
3	-0,0001853319	-0,0040624909	1,14786932
4	0,0982128871	-0,398173936	1,1354159

Com os coeficientes ajustados, recalcularam-se os DRs segundo a metodologia de AMORIM (2013) e, em seguida, reavaliou-se o erro percentual médio em relação aos “DRs reais”. Após a calibração, o maior erro individual foi reduzido para 27,57%, enquanto o EPM global caiu para 5,62%, representando uma melhora significativa na precisão do modelo e sua adequação ao contexto brasileiro.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos ao longo deste estudo permitem afirmar que a aplicação direta do modelo de AMORIM (2013), embora consolidada no contexto europeu, não se mostrou plenamente adequada para representar o comportamento das misturas asfálticas brasileiras. As discrepâncias observadas, traduzidas em erros percentuais médios elevados, evidenciam a limitação do uso indiscriminado de modelos desenvolvidos em realidades distintas da nacional, especialmente quando aplicados à análise estrutural de pavimentos.

Nesse sentido, a proposta de ajuste dos coeficientes do modelo, elaborada a partir de dados experimentais de misturas nacionais e apoiada por ferramentas de inteligência artificial, demonstrou-se eficaz na redução significativa desses erros, aproximando as estimativas da realidade brasileira. Mais do que uma simples calibração, esse processo representou uma etapa de adaptação metodológica, essencial para ampliar a confiabilidade do modelo no cenário nacional.

Assim, a principal contribuição deste trabalho reside justamente nessa adequação: um modelo originalmente concebido para condições europeias foi ajustado para refletir, com maior precisão, as particularidades das misturas betuminosas brasileiras, oferecendo um instrumento mais consistente para futuras análises de pavimentos no país.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, S.I.R. **Correção das deflexões obtidas com defletómetro de impacto devido às variações de temperatura** 2013. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Escola de Engenharia, Universidade do Minho.

BRUXEL, D.F. **Estudo do comportamento viscoelástico de concretos asfálticos convencionais e modificados através de ensaios de laboratório e de análise de desempenho** 2015. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria.

LOGANATHAN, K.; et al., *Int. J. Pavement Res. Technol.*, v. 12, p. 347 - 355, 2019.