

Análise do comportamento mecânico de pavimentos flexíveis considerando a variação sazonal de temperatura

Leandro Blass¹

Unipampa, Bagé, RS

Breno Tiago de Souza Mota²

UFOPA, Santarém, PA

Anderson Luís Jeske Bihain³

Unipampa, Bagé, RS

Everson Jonatha Gomes da Silva⁴

Unipampa, Bagé, RS

Resumo. O presente trabalho estudou o comportamento mecânico de um pavimento exposto a uma variação sazonal de temperatura, sob o carregamento do eixo padrão rodoviário. A análise levou em consideração diferentes espessuras de camadas para o revestimento asfáltico (5, 10 e 15 cm). O módulo de resiliência varia conforme a temperatura do pavimento, referentes aos meses de fevereiro e junho, das 13h00min horas às 19h00min, variando a cada hora e com T constante de 25°C (valor considerado nos projetos de pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes – DNIT). Através da ferramenta de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) (ferramenta do *software* MeDiNa), foram calculadas as deformações de tração (ϵ_t) e as deformações de compressão (ϵ_c) sofridas pelo carregamento. Com a utilização de modelos de previsão de desempenho, foi possível determinar o número de solicitações que poderá iniciar o afundamento de trilha de roda (N_{atr}) e trincamento por fadiga (N_{fad}). Finalmente, foi estimado sua vida útil, comparando com os valores da variação sazonal e DNIT (T constante). Os resultados mostraram que a temperatura e espessura do revestimento são importantes e deveriam ser consideradas nos projetos de pavimentação para se ter projeções mais realísticas.

Palavras-chave. Pavimento Flexível, Variação da Temperatura, Módulo de Resiliência.

1 Introdução

Pavimentos rodoviários são estruturas construídas visando fornecer ao usuário segurança e conforto, sua durabilidade está atrelada a inúmeros fatores físicos e mecânicos das camadas que o constitui. Tratando-se de sistemas flexíveis, a camada mais nobre da estrutura (revestimento) possui em sua composição derivados do petróleo (ligante asfáltico), sendo assim considerado um material termo sensível e, conseqüentemente, de complexo comportamento frente a passagem do tráfego [2]. Segundo [1], a variação de temperatura ao longo do perfil do pavimento é afetada principalmente pela alteração de temperatura ao longo da superfície, que varia continuamente durante os meses. Assumir um único módulo de resiliência para o pavimento pode superestimar ou subestimar as propriedades de rigidez, dependendo das condições climáticas prevalentes.

¹leandrobllass@unipampa.edu.br.

²brenotsm1@gmail.com

³andersonbihain@unipampa.edu.br.

⁴eversonsilva@unipampa.edu.br.

Segundo [9], a temperatura e a camada do revestimento tem influência na previsão na vida útil do pavimento. Isso pode ser afirmado conforme os ensaios numéricos realizados, que demonstraram a necessidade de uma avaliação criteriosa nos projetos de pavimentações. A temperatura deve ser considerada, pois, o material usado na camada de revestimento é visco elástico.

Através de dados experimentais de temperatura coletados de certo pavimento experimental localizado na cidade de Ijuí/RS, com o auxílio de termopares distribuídos pelo mesmo, foi possível, através da modelagem computacional da transferência de calor, estimar as temperaturas para determinadas profundidades do pavimento usadas no trabalho [3], [4].

O presente trabalho tem por objetivo estimar as deformações de tração (ϵ_t) e as deformações de compressão (ϵ_c) pelo AEMC/MeDiNa desenvolvido por [7] e, com esses dados, calcular o N_{atr} (valor de solicitações que levariam o pavimento a ruína por afundamento de trilha de roda) e N_{fad} (valor de solicitações que levariam o pavimento a ruína por fadiga) considerando diferentes revestimentos (5, 10 e 15 cm) e o módulo de resiliência variando com a temperatura e constante de 25C. A composição granular do pavimento típico é constituída de uma base 25 cm assente sobre o subleito natural. O carregamento utilizado será referente ao eixo padrão (eixo simples de rodas duplas com carga de 8,2 toneladas e pressão dos pneus de 0,56 MPa), costumeiramente utilizado nos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos.

2 Materiais e métodos

O estudo considerou o módulo de resiliência em função da temperatura e T constante de 25C conforme os projetos do DNIT. Usou-se do *software* AEMC/MeDiNa (que calcula tensões, deformações e deslocamentos em qualquer ponto da estrutura. O conjunto básico de respostas estruturais é calculada, a partir das equações elásticas, que englobam: tensões verticais; tensões radiais; tensões tangenciais; tensões de cisalhamento no plano vertical-radial; e deflexões verticais e radiais) para obter ϵ_t e ϵ_c [7]. Posteriormente, foi estimada a vida útil do pavimento através de modelos de N_{fad} e N_{atr} .

2.1 Pontos de Análise

Os pontos de análise utilizados na pesquisa estão no estudo de [10], o autor investigou as principais deformações no centro das rodas, na borda interior do pneu e no centro da roda externa. Para este tipo de eixo, trabalha-se na direção transversal do eixo (X) mantendo a direção longitudinal (Y) nula, conforme representando na Figura 1.

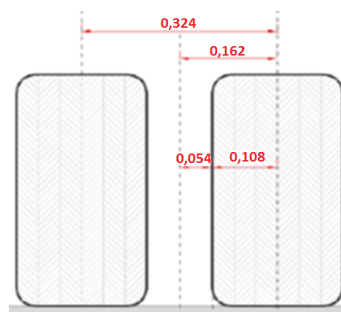


Figura 1: Pontos de análise eixo padrão (editada) [10]

Para o eixo Z, que representa a profundidade no decorrer das camadas do pavimento, os valores coletados são na fibra inferior do revestimento onde ocorre a ϵ_t , e na fibra superior do subleito

onde ocorre a ϵ_c . Foram analisados os casos críticos, apenas os valores máximos para os esforços.

2.2 Módulo de Resiliência

A equação usada para determinar o módulo de resiliência de pavimentos asfálticos em função da temperatura é da por [1]:

$$M_R = 1500 - 7900 \log(T) \quad (1)$$

em que, M_R é o módulo de resiliência em MPa, T é a temperatura em °C. Para determinação dos gradientes de temperatura foram utilizados dados referentes à pesquisa de [3], [4] para os meses de fevereiro e julho. A escolha dos dados se deu pelo fato destes meses exibirem as variações máximas e mínimas. O módulo de resiliência varia com a temperatura conforme a equação (1), as simulações foram realizadas usando os dados experimentais e temperatura constante de 25°C, valor que norteia os principais testes e avaliações de pavimentos recomendados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), [6].

2.3 Modelo para Trincamento por Fadiga e Deformação Permanente

Segundo [8], o trincamento por fadiga é um processo de deterioração que pode acontecer quando o pavimento esteja submetido a tensões e deformações repetidas, resultando em fissuras após certas repetições. O modelo proposto pela Federal Highway Administration (FHWA) foi obtido através do ajuste de uma função exponencial a dados experimentais, através do método dos mínimos quadrados, utilizando a técnica de linearização. O modelo encontrado depende do ϵ_t [11]:

$$N_{fad} = 1,092 \cdot 10^{-6} \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{3,512} \quad (2)$$

em que, N_{fad} é o valor de solicitações que levariam o pavimento a ruína por fadiga. Segundo [6], a deformação permanente é caracterizada pelos afundamentos ao longo da trilha da roda, sendo notável uma depressão na superfície do pavimento, causadas por deformações de compressão. O cálculo do N_{atr} para deformação permanente pode ser efetuado conforme equação elaborada pelo Asphalt Institute Design Method (AIDM) [5].

$$N_{atr} = 1,365 \cdot 10^{-9} \epsilon_c^{3,512} \quad (3)$$

em que, N_{atr} é o valor de solicitações que levariam o pavimento a ruína por afundamento de trilho de roda. A Equação (3) também é um modelo não linear, obtido por linearização ajustado a dados experimentais.

3 Resultados e Discussões

Com os valores obtidos de ϵ_t e ϵ_c diante das simulações computacionais realizadas pelo *software* AEMC/MeDiNa, pode-se comparar os valores das respostas estruturais do pavimento durante a atuação do eixo padrão e a influência da temperatura versus espessura do revestimento, confrontando esses dados com a forma que o pavimento responde segundo as especificações do DNIT (revestimento a temperatura constante de 25°C). Os dados da variação sazonal para cada diferente revestimento são os maiores valores associados a cada hora do dia conforme será representado nas figuras. A Figura 2 representa a deformação de tração para o mês de fevereiro, o eixo horizontal representa o tempo em horas, ou seja, as 13h00m é representada por 1, a cada valor numérico tem-se uma hora, totalizando em 19h00m para o valor 7.

Analisando a Figura 2, pode-se perceber que a utilização da variação da temperatura para o cálculo da rigidez do material asfáltico tem impacto significativamente mais acentuado na estrutura mais delgada (revestimento de 5cm). Isto ocorre, pois, em concretos asfálticos (CA) de menor espessura, a variação de temperatura ao longo da profundidade do revestimento é maior que àquela observada em camadas robustas de CA. Com maiores espessuras, às altas temperaturas do ar aquecem com maior intensidade a parcela do revestimento mais próxima da superfície, mantendo mais estáveis as temperaturas da região inferior do material, localizada próxima à base granular. Consequentemente, em revestimentos esbeltos, uma maior parcela do material termosuscetível é atingida pelas temperaturas registradas, causando, no caso do mês de fevereiro, perda de rigidez e, consequentemente, maiores deformações de tração geradas pela passagem do carregamento.

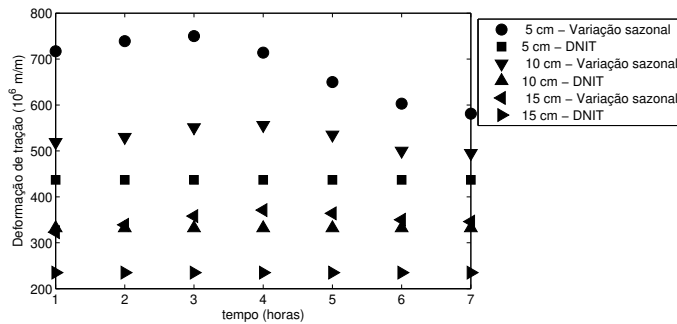


Figura 2: Deformação de tração microstrain (μs) versus tempo, para o mês de fevereiro

Fica destacado também a influência dos gradientes de temperatura ao se analisar a Tabela 1, que está representado o número de solicitações para o aparecimento de fadiga para o mês de fevereiro. O percentual considerado é do acréscimo (aumento) do número de solicitações caso seja considerado a temperatura constante de 25°C.

Tabela 1: Cálculo do N_{fad} para os diferentes revestimentos.

Revestimento	Variação Sazonal	DNIT	Percentual (%)
5 cm	$2,5 \cdot 10^5$	$6,9 \cdot 10^5$	171,0
10 cm	$4,4 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^6$	306,0
15 cm	$2,0 \cdot 10^6$	$6,1 \cdot 10^6$	205,0

Na Tabela 2 esta, representado o número de solicitações para o aparecimento de fadiga para o mês de junho. Os valores das solicitações usando a variação sazonal são um pouco menores ao considerar a temperatura 25C.

Tabela 2: Cálculo do N_{fad} para os diferentes revestimentos.

Revestimento	Variação Sazonal	DNIT	Percentual (%)
5 cm	$7,0 \cdot 10^5$	$6,9 \cdot 10^5$	-2,3
10 cm	$1,9 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^6$	-7,2
15 cm	$1,1 \cdot 10^7$	$6,1 \cdot 10^6$	-23,1

Quanto à deformação de tração, percebe-se que a temperatura é um dos fatores muito importante na vida útil de pavimentos flexíveis. A utilização da temperatura constante aumenta a vida

de fadiga, pelo modelo de avaliação utilizado. No mês quente, o N_{fad} de fadiga é sempre maior utilizando a temperatura de referência de 25°C. No mês frio, o pavimento fica mais rígido utilizando as temperaturas reais (ficam abaixo de 25°C), reduzindo assim as deformações de tração. Pode ser observado na Figura 3 que mesmo sendo considerado o mês que se obteve os menores gradientes de temperatura os valores da deformação não diferem muito aos comparados com a temperatura constante, o que reforça e justifica o desenvolvimento da pesquisa aqui realizada.

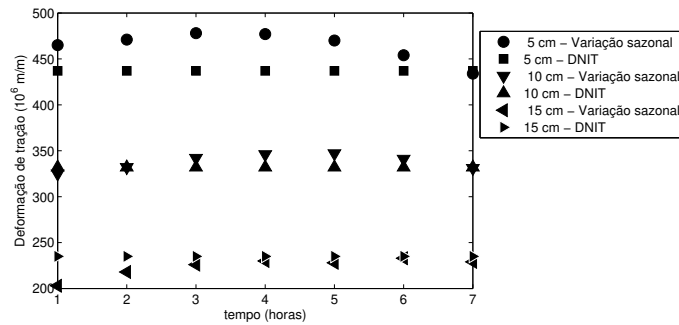


Figura 3: Deformação de tração microstrain (μs) versus tempo, para o mês de junho

Pela análise da Figura 4, pode-se perceber que, no mês de fevereiro, a espessura mais delgada foi a que menos apresentou diferença nos esforços calculados a partir da passagem de carga, quando comparadas as situações em que o módulo resiliente é considerado constante e variável. Isto ocorre, pois, o critério utilizado, avaliando apenas a deformação de compressão no topo do subleito, considera a movimentação elástica de todo o sistema de camadas.

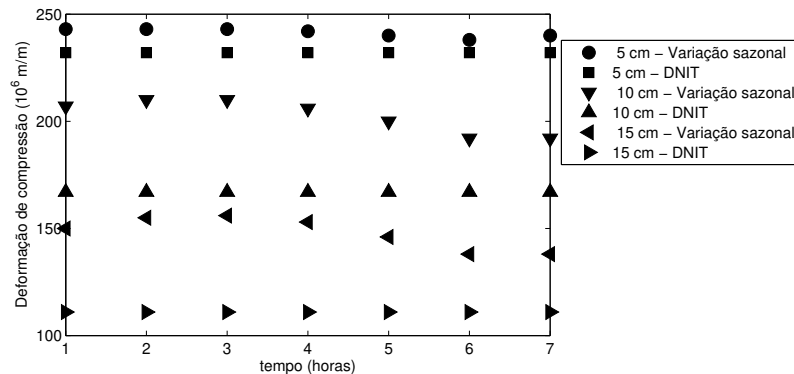


Figura 4: Deformação de compressão (μs) versus tempo, para o mês de fevereiro

Na Tabela 3 está representado o número de solicitações para o aparecimento de afundamento para trilha de roda para ao mês de fevereiro.

O percentual considerado é do acréscimo (aumento) na Tabela 3, ou seja, do número de solicitações caso seja considerado a temperatura constante, 25°C. A Figura 5 representa a deformação de compressão para o mês de junho. Percebe-se que os valores considerando a temperatura constante estão muito próximos quando variando os gradientes, isso indica que houve pouca insolação e como consequência pequenas variações nos gradientes.

Na Tabela 4 está representado o número de solicitações para o aparecimento de afundamento para trilha de roda para ao mês de junho.

Tabela 3: Cálculo do N_{atr} para os diferentes revestimentos.

Revestimento	Variação Sazonal	DNIT	Percentual (%)
5 cm	$2,3 \cdot 10^7$	$2,6 \cdot 10^7$	12,1
10 cm	$5,9 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^8$	86,7
15 cm	$2,6 \cdot 10^8$	$6,9 \cdot 10^8$	165,0

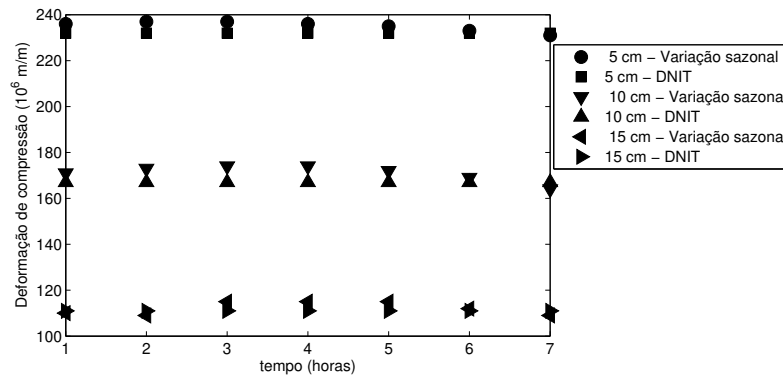


Figura 5: Deformação de compressão (μs) versus tempo, para o mês de junho

O percentual considerado é do decréscimo do N_{atr} número de solicitações caso seja considerado a temperatura constante 25°C como é considerado nos projetos de pavimentação segundo DNIT.

4 Conclusões

De acordo com o delinear metodológico estabelecido neste trabalho, foi possível concluir que:

a) A relação entre a espessura do revestimento e as respostas a ações de uma carga, sendo que para revestimentos mais robustos as forças decorrentes de tais ações em sua superfície se tornam mais amenas, dessa forma prolongando a vida útil do pavimento conforme os modelos de desempenho anteriormente listados;

b) A partir deste estudo pode-se notar que existem influências nos esforços e na previsão da vida útil do pavimento, conforme o N_{fad} calculado fica evidente que quando o pavimento está exposto a gradientes de temperatura sua vida útil varia, o que não é previsto quando considerado a temperatura constante de 25°C . Isso também acontece quando for avaliado o N_{atr} . Demonstrando assim que existe necessidade de serem avaliados estes parâmetros corretamente;

c) Ao analisar o N_{fad} pelo modelo no mês de junho são maiores que no mês de fevereiro, pois o pavimento está mais frio, aumentando a rigidez do concreto asfáltico e, conseqüentemente, diminuindo os esforços de tração no pavimento, este caso aproximou mais da realidade estabelecida quando considerada a temperatura constante;

d) Considerando os percentuais para o N_{fad} tem uma acréscimo em relação a temperatura de referência que estão nas Tabelas 2 e 3, mostrando que, em junho, você tem N_{fad} calculados com as variações de temperatura maiores do que a referência. Já em fevereiro os N_{fad} são menores calculados com a variação de temperatura em relação à referência. Isto se explica pelo decréscimo da rigidez do pavimento em temperaturas mais elevadas, aumentando os esforços de tração e reduzindo a vida de fadiga.

Tabela 4: Cálculo do N_{atr} para os diferentes revestimentos.

Revestimento	Varição Sazonal	DNIT	Percentual (%)
5 cm	$2,6 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^8$	-1,9
10 cm	$1,2 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^6$	-7,7
15 cm	$7,5 \cdot 10^8$	$6,9 \cdot 10^8$	-7,8

5 Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq pelo Auxílio a Pesquisa – APQ (Universal 2018), processo n°. 423235/2018-4 e a Universidade Federal do PAMPA - UNIPAMPA.

Referências

- [1] Alkasawneh. W, Pan. E, Zhu. F, Green. R. Effect of temperature variation on pavement responses using 3D multilayered elastic analysis, *International journal of Pavement*, 203 – 212, 2007. DOI: 10.1080 / 10298430601116741.
- [2] Balbo, J. T. *Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração, 1a. edição*. Editora Oficina de Textos, São Paulo, 2007.
- [3] Blass, L. Modelagem Matemática de Respostas Estruturais em Pavimentos Flexíveis Considerando a Variação Sazonal de Temperatura. Dissertação de mestrado, Unijuí, 2011.
- [4] Blass, L, Specht, L. P, Borges, P. A, Pereira, D. S. Modelagem matemática das respostas estruturais de pavimentos flexíveis considerando a variação sazonal de temperaturas máximas, *Teoria e Prática na Engenharia Civil (Online)*, v. 13, 61-71, 2013.
- [5] Bueno, L. D. Determinação do potencial destrutivo do eixo duplo direcional no dimensionamento de pavimentos flexíveis. Dissertação de mestrado, UFSM, 2014.
- [6] Departamento Nacional de Infra - estrutura de Transporte (DNIT) *Manual de pavimentação, 3a. edição*. Rio de Janeiro, 2006.
- [7] Franco, F. A. C. P. Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos - SISPAV. Tese de Doutorado, COPPE/ UFRJ, 2007.
- [8] Medina, J. Motta, L.M.G. *Mecânica dos Pavimentos*, 3a. edição. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2015.
- [9] Molin, M. Blass, L. Bihain, A. L. J, Bueno, L. D. Budny, J. Altnetter, M. V. Souza, A. L. R. Kazmirski, J. Silva, E. J. G. Modelagem Computacional no Estudo de Deformações em Pavimentos Flexíveis. *REVISTA CEREUS*, v. 10, p. 170-179, 2018.
- [10] Ribas, J. Parâmetros elásticos típicos de materiais de pavimentos flexíveis do Rio Grande do Sul e sua aplicação em uma análise de custo/benefício. Dissertação de mestrado, UFSM, 2014.
- [11] Rossato, F. P. Avaliação do fenômeno de fadiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas. Dissertação de mestrado, UFSM, 2015.