

# **Modelagem matemática das respostas estruturais de pavimentos flexíveis considerando a variação sazonal de temperaturas máximas**

## **Mathematical modeling of the flexible pavements structural response considering the seasonal variation of maximum temperatures**

**Leandro Blass<sup>1</sup>, Luciano P. Specht<sup>2</sup>, Pedro A. P. Borges<sup>3</sup>, Deividi S. Pereira<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Universidade do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, RS*  
*e-mail: leandroblass@hotmail.com*

<sup>2</sup>*Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, RS*  
*e-mail: luspecht@ufsm.br; dsp@ufsm.br*

<sup>3</sup>*Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS, Chapecó*  
*e-mail: papborges@gmail.com*

**RESUMO:** O conhecimento de informações sobre a região, variações climáticas e as propriedades dos materiais se tornam essenciais para a tomada de decisões para construção, manutenção e restauração de pavimentos rodoviários. Este artigo investiga o comportamento mecânico do pavimento flexível considerando as variações máximas de temperatura ao longo de um ano; para tanto foi modelada a transferência de calor com base em dados experimentais e, a partir dos perfis de temperatura de cada mês, foram calculadas as respostas estruturais no pavimento utilizando-se o Método dos Elementos Finitos 3D. Foram calculadas as deformações de tração em cada intervalo de tempo considerando espessuras de revestimentos de 4, 8 e 12 cm. Fica patente, a partir dos resultados, que a consideração de temperatura constante em 25°C é uma aproximação pouco fidedigna da realidade.

**ABSTRACT:** The knowledge about the region, climate change and the material properties become essential for decision-making for construction, maintenance and restoration of road pavements. This paper investigated the mechanical behavior of flexible pavement considering the maximum variation in temperature over a year; it was modeling the heat transfer and determine the temperature profiles of each month confronting them with experimental data; the structural pavement responses were calculated using Finite Element Method 3D. They were calculated the strain at each time interval considering coating layer thicknesses of 4, 8 and 12cm. It's clear, after the results, that the consideration of constant temperature in 25°C generates results far from reality.

### **1. INTRODUÇÃO**

O pavimento é uma estrutura composta por múltiplas camadas de diferentes espessuras com diferentes funções, tais como distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego e propiciar uma superfície de rolamento que atenda aos requisitos de conforto e segurança para o

tráfego de veículos independente das condições climáticas.

Nos pavimentos flexíveis, a camada de revestimento geralmente é constituída de mistura asfáltica produzida com derivados do petróleo que são materiais visco-elásticos, termossensíveis e tem a rigidez e resistência alterada com a temperatura, tendo como principais funções

impermeabilizar a superfície e distribuir os esforços das cargas aplicadas.

No Brasil, os principais agentes de degradação dos pavimentos flexíveis são as deformações de tração das misturas asfálticas (que contribuem para a ruptura por fadiga), devido à repetição das cargas do tráfego, e as deformações permanentes que levam à ruptura por afundamento em trilhas de roda.

A fadiga pode ser entendida como a degradação do material por efeito de solicitações recebidas. Este fenômeno é caracterizado pelo aparecimento de trincas que proporcionam a deterioração irreversível do material. É um processo de mudança estrutural progressiva e localizada que ocasiona em fissuras e conduz à falha após um determinado número de ciclos ou solicitações.

Estas características de desempenho estão relacionadas a vários fatores como: propriedades físicas e mecânicas das camadas que constitui o pavimento, clima, tráfego, carga excessiva dos veículos e pressão dos pneus. A temperatura é um dos mais importantes fatores que afeta o desempenho de um pavimento, tanto nas condições estruturais como funcionais [12, 16].

A elevação da temperatura atua de dois modos na vida de fadiga de misturas asfálticas: diminuindo tanto o módulo resiliente quanto a resistência à tração do material ocasionando um processo de micro fissuração progressiva [12, 6, 14].

As variações de temperatura são caracterizadas por gradientes térmicos elevados que diminuem com a profundidade, fazendo com que, principalmente, a camada de revestimento tenha menor elasticidade e resistência às cargas [12, 16, 4, 9, 19].

O fenômeno da fadiga se inicia, tradicionalmente, na fibra inferior do revestimento e a cada passagem de um veículo uma nova solicitação é imposta. Desta forma o dano vai se acumulando e a camada de revestimento, progressivamente trincando. A Hipótese de Miner explicita tal fenômeno Eq.(1).

$$D = \sum_{i=1}^{i=h} D(i) = \sum_{i=1}^{i=h} \frac{n(i)}{N(i)} (i) \quad (1)$$

onde,

D - dano total acumulado durante o período tempo, que deverá ser, no limite, igual a 100%;  $D(i)$  - dano no tempo  $i$ ;  $n(i)$  - número de aplicações da carga no tempo  $i$ ;  $N(i)$  - número máximo de

aplicações da carga, de acordo com o critério de dimensionamento utilizado, nas condições existentes no tempo  $i$ .

A aplicação prática da Hipótese de Miner leva o projetista a dividir o período de projeto em frações de tempo  $h$ , que são caracterizadas pelo tráfego e pelas condições climáticas. Em muitos projetos esta divisão é negligenciada e considera-se a temperatura ambiente constante e igual a 20°C ou 25°C e o tráfego distribuído uniformemente durante o período de análise. Mais modernamente, com a utilização de sistemas automatizados como o MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*) [3] e o SISPAV [10], que dividem o tempo em meses, há a consideração da temperatura e o tráfego médio do mês. É evidente que considerar médias mensais de temperatura em uma camada (variações sazonais) é importante e representa um avanço, no entanto, o gradiente diário de temperatura dentro da camada também tem um papel relevante e merece ser investigado.

Neste contexto, a presente pesquisa tem como objetivo estudar, a partir do monitoramento de um pavimento experimental, a transferência de calor modelando os picos de temperatura e verificar sua importância nas respostas mecânicas de pavimentos flexíveis.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Planejamento do experimento

O planejamento da pesquisa consistiu nas seguintes etapas: instrumentação de um pavimento flexível durante 12 meses; modelagem da transferência de calor, focado no pico de temperatura máxima tendo como base os dados experimentais de cada mês; simulação numérica, através do MEF – Método dos Elementos Finitos em três dimensões, das deformações específicas de tração para cada mês, considerando o pico de temperatura característico já calculado.

### 2.2. Coleta de dados experimentais

O pavimento flexível utilizado nos experimentos está localizado no Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUI, em Ijuí-RS, sendo constituído por subleito argiloso (ISC=9%), sub-base em macadame seco, base em brita graduada simples (Faixa C do DNIT) e revestimento asfáltico. Foram instalados termopares a cada 3cm de profundidade até o final da camada de revestimento (15cm de espessura). Também foi

instalado um termopar a 40cm para verificar a variação de temperatura nesta profundidade, conforme a Figura 1.

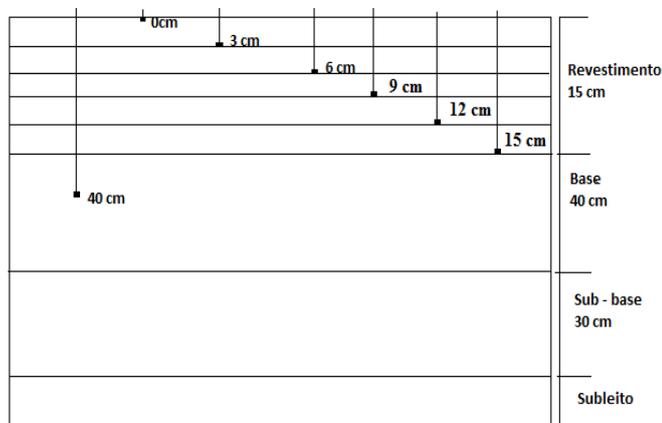


Figura 1- Pavimento flexível experimental

As leituras das temperaturas foram realizadas em períodos de dez dias durante cada mês, considerando o horário de pico térmico ao ar (entre treze a dezesseis horas), e com um intervalo de vinte minutos. Cabe salientar que as leituras aconteceram apenas em dias que houve forte insolação, pois estas foram as que descreveram melhor as máximas variações de temperatura no pavimento.

### 2.3. Modelagem matemática da transferência de calor

Para modelar a transferência de calor foi utilizada a equação da condução do calor [13, 11] em uma dimensão, em coordenadas cartesianas ortogonais, representada pela Eq. (2). Esta equação foi usada para se obter os gradientes térmicos em duas etapas: solução analítica com difusividade constante (caso linear), utilizada para determinar a malha da solução numérica do mesmo problema; solução numérica da Eq. (2), com difusividades variáveis (caso não linear), implementada para obter a distribuição de temperatura no pavimento em diferentes tempos. As soluções numéricas foram desenvolvidas utilizando o Método de Diferenças Finitas, com o esquema implícito de avanços temporais.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}; \quad (2)$$

$$0 < z < H \quad \text{e} \quad t > 0$$

onde  $T$  é a temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ );  $z$  é a variável espacial (m);  $H$ : espessura (m);  $t$  e o tempo (s) e  $\alpha_i$  é a difusividade térmica em cada camada  $i$  do pavimento ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

As temperaturas na superfície (0cm),  $T_s(t)$ , e na base,  $T_b(t)$ , foram obtidas experimentalmente, assim como também a condição inicial de temperatura,  $T_i(z)$ . As condições de contorno são de primeira espécie e obedecem às expressões de 2a a 2c, onde:

$$T(0, t): T_s(t) \text{ para } t > 0 \quad (2a)$$

$$T(H, t): T_b(t) \text{ para } t > 0 \quad (2b)$$

$$T(z, 0): T_i(z) \text{ para } 0 < z < H \quad (2c)$$

A difusividade térmica  $\alpha_1 = 4,43 \cdot 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ , usada para a camada do revestimento, foi determinada por Specht *et al.* [17], utilizando três métodos: processo experimental, algoritmo proposto por Shiozawa *et al.* [15] e problema inverso; o  $\alpha_2 = 7,07 \cdot 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  usado para base foi o recomendado pela ABNT [5].

### 2.4. Cálculo das respostas estruturais do pavimento

Para o cálculo das deformações pelo MEF foi utilizado o *software EFin3D* desenvolvido aproveitando rotinas específicas, o RIOPAVE, e tendo como base o programa exemplo do Curso de Introdução ao Método dos Elementos Finitos do Programa de Engenharia Civil da COPPE, com o objetivo de adaptar a técnica do MEF à particularidade da análise de estruturas de pavimentos [10].

Também se considerou diferentes espessuras de camadas de revestimento (4, 8 e 12cm), pressão dos pneus de 0,80 MPa, carga de configuração do eixo tandem duplo (ETD) de 17000kg (carga máxima legal) e 2125 kg por roda, distância entre os eixos de 1,2m e entre as rodas de 0,275m, com uma área de contato pneu/pavimento de  $0,026562 \text{m}^2$  e raio da área de contato de  $0,0919 \text{m}$ . A camada de revestimento foi subdividida em 4 subcamadas iguais, de forma a considerar as diferentes temperaturas e a rigidez correspondente em cada subcamada. Maiores detalhes metodológicos da pesquisa podem ser encontrados em Ref. [7].

### 3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados da primeira etapa da pesquisa, modelagem da transferência de calor, estão representados nas Figuras 2 e 3, que mostram a distribuição de temperatura obtida com o MDF (Num) para diferentes profundidades na camada de revestimento asfáltico, comparando com os dados experimentais (Exp) para os meses de fevereiro e junho, onde foram registradas as maiores e menores variações de temperatura no pavimento.

Os picos máximos de temperatura na camada de revestimento em todas as diferentes subcamadas acontecem no horário das treze (0s) às dezenove horas (22650s).

A temperatura medida com o sensor na camada granular, a 40cm de profundidade, não apresentou significativas variações de temperatura; a máxima foi de *software EFin3D* [10] 25°C no mês de dezembro e a mínima 18°C no mês de junho.

A partir do perfil de temperatura, é possível determinar o módulo de rigidez utilizado para calcular as deformações através do MEF, em um problema típico de elasticidade tridimensional em cada intervalo de tempo. Vários pesquisadores propuseram equações simplificadas para estimar o módulo de elasticidade em função da temperatura com base no laboratório e/ou de testes de campo [20, 18, 16, 1, 2]. Estes e outros modelos estão representados na Figura 4.

O ajuste exponencial da média dos valores obtidos pelos modelos na escala de 0 a 60°C foi aquele que melhor descreveu a rigidez com o aumento da temperatura. Desta forma, para cada mês em que os dados experimentais foram obtidos, calculou-se a rigidez nas diferentes profundidades e períodos de tempo através da Eq. (4), representando os módulos de rigidez para os meses de fevereiro e junho, onde se tem os maiores e menores gradientes de temperatura,.

$$E = 220003 * e^{-0,044*T} \quad (4)$$

onde,

E é o módulo da elasticidade (MPa), T é a temperatura (°C).

Na Figura 5 encontram-se os módulos de rigidez referentes aos meses de fevereiro e junho e para as diferentes subcamadas de 1cm. Os módulos variam com o tempo e profundidade. No mês de fevereiro foram registradas as temperaturas mais

altas, por consequência, a maior queda de rigidez. Ao contrário, os menores gradientes foram observado para o mês de junho.

Também se considerou o coeficiente de Poisson variando de acordo com a temperatura em cada ponto. A Eq. (5) foi ajustada pelos dados fornecidos pela British Standards DD213 [8]: para T (°C) = 10,  $\nu = 0,1$ ; T (°C) = 25,  $\nu = 0,3$ ; T (°C) = 45,  $\nu = 0,45$ .

$$\nu = 0,5 \cdot (1 - e^{-0,0369 \cdot T}) \quad (5)$$

Na Figura 6 são apresentadas as deformações de tração ( $\epsilon_t$ ) e as deformações de tração considerando a temperatura constante de 25°C ( $\epsilon_t T_c$ ) para o mês de fevereiro, nas diferentes espessuras de revestimento consideradas. Para 4cm a temperatura tem maior influência por apresentar um maior gradiente. As deformações máximas não acontecem, necessariamente, no pico de temperatura porque algumas camadas ainda estão em fase de aquecimento.

Na Figura 7 estão representadas as deformações calculadas para os diferentes revestimentos considerando o mês de junho. O pico de deformação varia para as diferentes espessuras de revestimentos. Para a camada com 4cm há maior influencia da temperatura nas deformações, assim como observado para o mês de fevereiro. O horário do pico de deformação máxima varia com as espessuras, para 4cm acontece às 14h40, para 8cm acontece às 15h40 e para 12cm às 16h00.

As deformações para cada mês do ano de 2010, considerando a espessura do revestimento de 4cm, estão representadas na Figura 8. As deformações variaram de forma proporcional à influência da temperatura nas propriedades dos materiais, um revestimento delgado sofre maiores deformações com gradientes altos de temperatura, isso ocorreu nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro devido a forte insolação. Existe uma grande diferença para cada um dos meses do ano, em comparação com o caso em que a temperatura é constante. O mês de junho é o que apresentou menores variações da temperatura e deformações neste período de tempo. As temperaturas assim como as deformações ao longo do perfil do pavimento se alteram, dependendo dos fatores climáticos externos e da hora do dia.

Na Figura 9 estão representadas as deformações para todos os meses do ano e para o caso de 8cm, comparando a deformação quando a temperatura é constante; ainda tem-se uma grande diferença para

os meses com altos gradientes de temperatura, notadamente em janeiro, fevereiro e dezembro; nos três meses mais frios: junho, julho e agosto a temperatura tem importância relativa menor, ficando os resultados mais próximos da hipótese de considerar a temperatura constante à  $25^{\circ}\text{C}$ .

Na Figura 10 os dados comprovam que a espessura da camada está contribuindo para que ocorram menores deformações; em espessuras maiores a variação de temperatura é menor assim como as deformações. Verifica-se que no mês de fevereiro no revestimento de 4cm a deformação máxima foi de  $426\mu\epsilon$ , e para 12cm a máxima é de  $203\mu\epsilon$ ; para junho no revestimento de 4cm a máxima é de  $257\mu\epsilon$  e para 12cm é de  $108\mu\epsilon$ .

Na mesma Figura 10 é possível observar que, para o mês de junho e em certos horários, a deformação fica abaixo da linha pontilhada, isso ocorre porque a temperatura nesses pontos é inferior a  $25^{\circ}\text{C}$ , verifica que o horário das máximas deformações para 12cm é em torno das 16h00, enquanto que para o revestimento de 4 cm acontece às 14h40.

#### 4. CONCLUSÕES

As máximas temperaturas variam de acordo com o tempo e a profundidade considerada; na superfície acontecem por volta das 14h20 enquanto que as máximas deformações acontecem por volta das 16h00. O mês de fevereiro foi o que apresentou maiores variações de temperatura e consequentemente, maiores deformações de tração na fibra inferior do revestimento, o inverso aconteceu para o mês de junho. As temperaturas assim como as deformações ao longo do perfil do pavimento se alteram, dependendo dos fatores climáticos externos e da hora do dia. A temperatura a 40cm de profundidade esteve ao longo do ano entre  $18^{\circ}\text{C}$  no mês de junho e  $25^{\circ}\text{C}$  no mês de dezembro.

Para a estrutura de pavimento analisada, onde o ponto crítico de deformação de tração foi abaixo de uma das rodas, a espessura do revestimento (4, 8 e 12cm) demonstra influência nas deformações, todavia esta influência é menor que a causada pelo gradiente térmico. Verifica-se que no mês de fevereiro, para o revestimento de 4cm, a deformação máxima foi de  $426\mu\epsilon$ , e para 12cm a máxima é de  $203\mu\epsilon$ ; para junho, no revestimento de 4cm, a máxima é de  $257\mu\epsilon$  e para 12cm é de

$108\mu\epsilon$ , essas variações estão ligadas a temperatura e espessura da camada.

A temperatura tem grande influência no módulo de elasticidade e no coeficiente de Poisson e, como consequência, nas respostas estruturais de um pavimento flexível. Ao menos nos horários de picos de gradientes na região sul do Brasil, percebeu-se que a consideração de uma temperatura constante na mistura asfáltica, da ordem de  $25^{\circ}\text{C}$ , conduziria a um subdimensionamento da estrutura viária. A partir da modelagem matemática é possível considerar os efeitos de temperatura aliados ao tráfego o que, certamente, leva a estimativas mais realistas do desempenho de pavimentos flexíveis.

#### Agradecimentos

O segundo autor agradece ao CNPq pela bolsa PQ 302860/2011-8.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ali, H.; Lopez, A. *Statistical analysis of temperature and moisture effects on pavement structural properties based on seasonal monitoring data*. Transportation Research Record 1540, pp. 48–55, 1996.
2. American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO. *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials. 1993.
3. American Association of State Highway and Transportation Officials. *AASHTO 2004 - Guide for design of pavement structures*. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials. 2004.
4. Alkasawneh, W.; Pan, E.; Zhu, F.; Green, R. *Effect of temperature variation on pavement responses using 3D multilayered elastic analysis*, International Journal of Pavement, Engenharia, pp. 203 – 212. 2007
5. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Desempenho térmico de edificações - Parte 1: Definições, símbolos e unidades*. NBR 15220-1. Rio de Janeiro, 2005.
6. Balbo, J.T. *Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558p.

7. Blass, L. *Modelagem matemática de respostas estruturais em pavimentos flexíveis considerando a variação sazonal de temperatura*. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2011.
8. British Standards Institution. *Determination of the indirect tensile stiffness modulus of bituminous mixtures*. DD213. London, 1993. 16p.
9. Chong, W.; Tramontini, R.; Specht, L.P. *Application of the laplace transform and its numerical inversion to temperature profile of a two-layer pavement under site conditions.. Numerical Heat Transfer*. Part A, Applications. v.55, p.1004 - 1018, 2009;
10. Franco, F.A.C.P. *Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos - SISPAV*. Tese de Doutorado. COPPE/ UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
11. Incropera, F.P.; De Witt, D.P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC,. Traduzido por: Carlos Alberto Biolchini da Silva. Departamento de Engenharia Mecânica, UERJ. Tradução de: Fundamentals of heat and mass transfer. 2003. 698 p.
12. Medina. J.; Motta, L.M.G. *Mecânica dos Pavimentos*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2005. 570p.
13. Özisik, M.N. *Heat conduction*. John Wiley & Sons. New York, 1993.
14. Papagiannakis, A.T.; Masad, E.A. *Pavement design and materials*. Texas, Wiley, 2008.
15. Shiozawa, S.; Campbell, G.S. *Soil thermal conductivity*. Remote Sensing Reviews. Vol. 5(1), pp. 301-310, 1990.
16. Specht, L.P. *Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Porto Alegre, UFRGS, 2004.
17. SPECHT, L. P., BORGES, P. A., HELMANN, L. Determinação das propriedades térmicas de concretos asfálticos com diferentes tipos de ligantes. *Revista Tecnológica (UNIFOR)*, v. 29, p. 198-210, 2008.
18. Ullidtz, P. *Pavement Analysis*. The Technical University of Denmark. 1987
19. Vassoler, G.; Chong, W.; Specht, L.P. *Comportamento mecânico de pavimentos flexíveis submetidos a gradientes térmicos*. *Acta Scientiarum. Technology (Online)*. , v.33, p.265 - 271, 2011.
20. Witczak, M.W. *The universal airport pavement design system, report II: asphalt mixture material characterization*. University of Maryland, 1989.

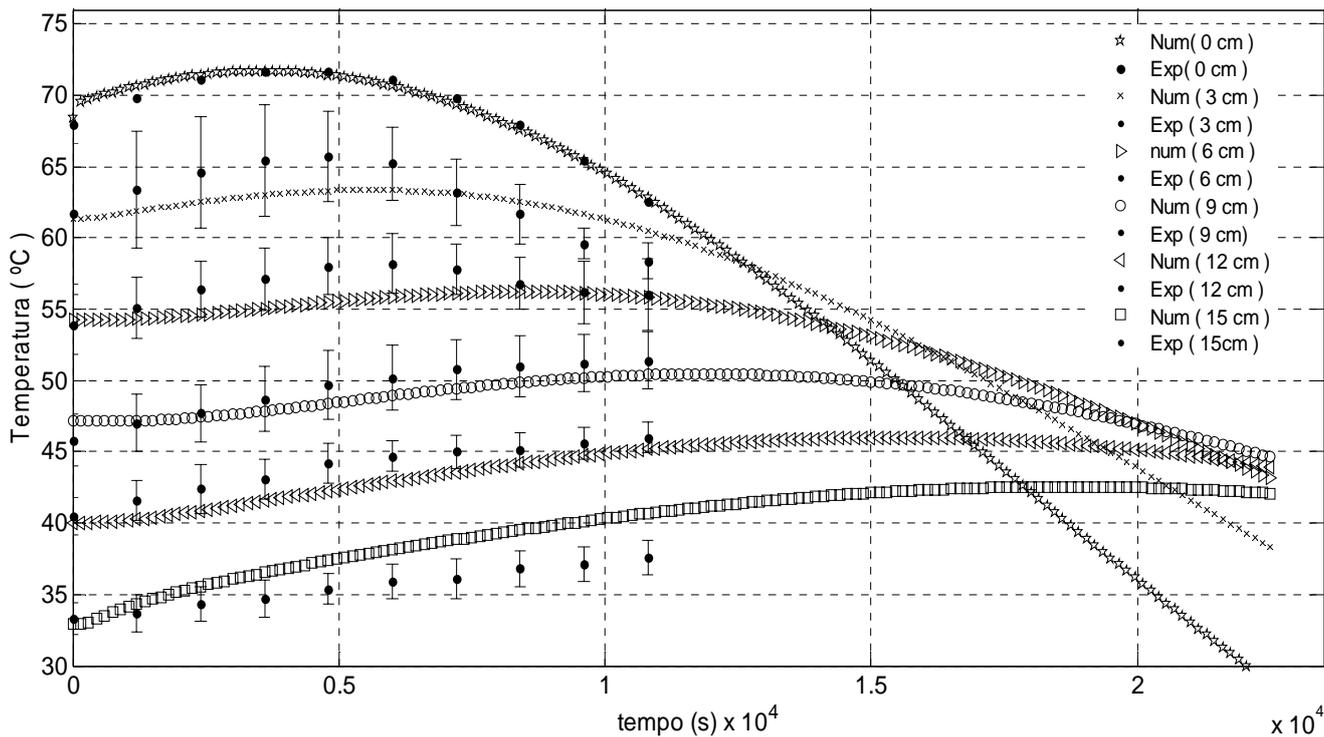


Figura 2 - Dados experimentais e método numérico para o mês de fevereiro

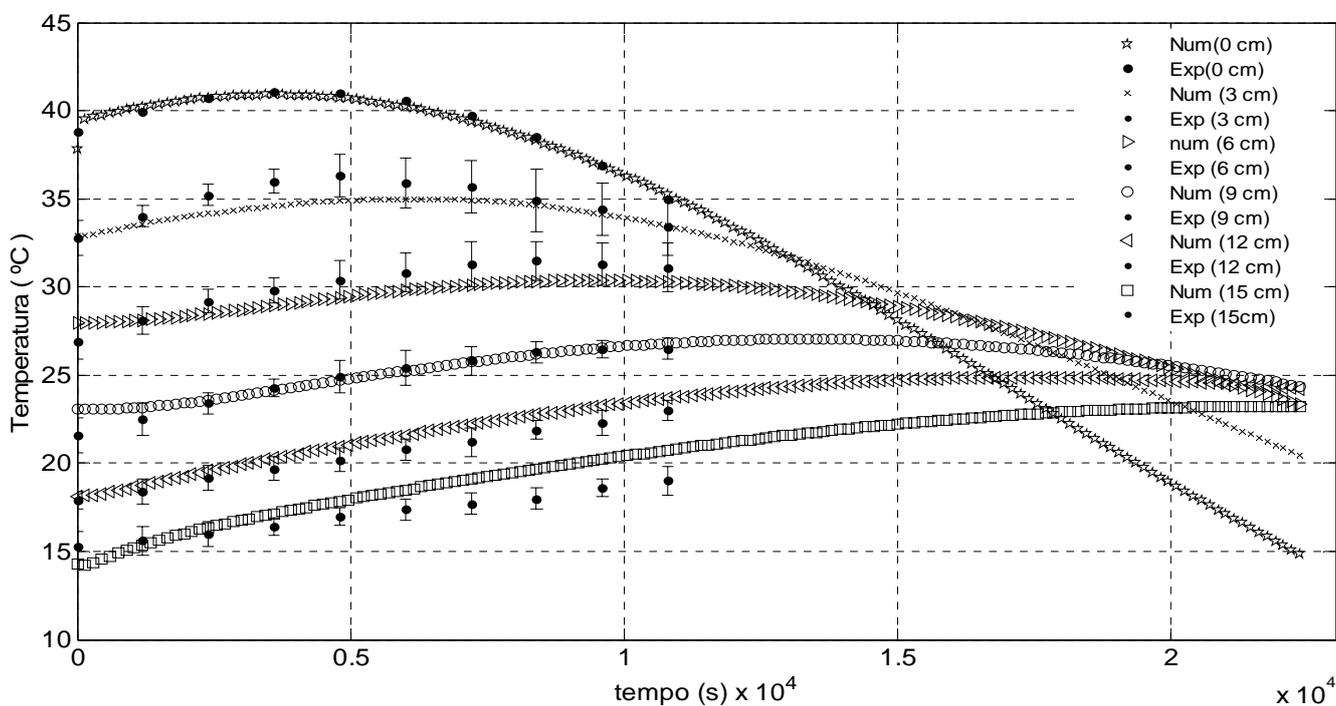


Figura 3 - Dados experimentais e método numérico para o mês de junho

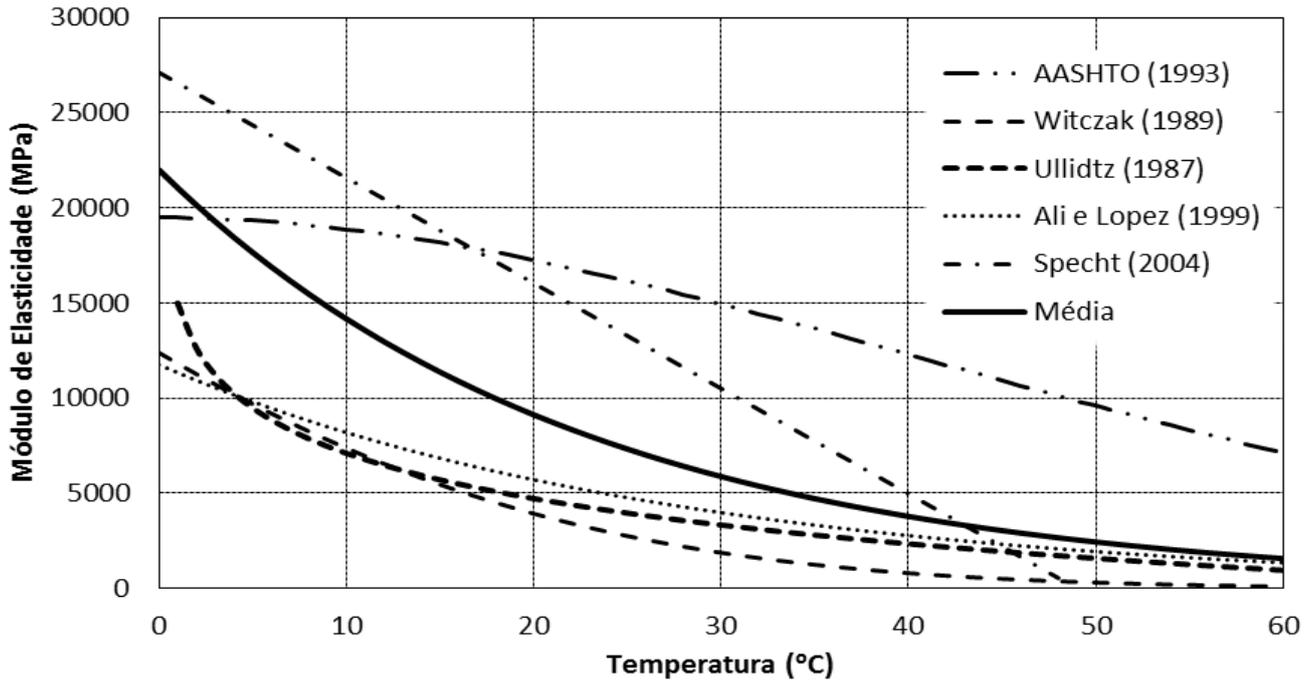


Figura 4 - Modelos de Módulo de Elasticidade em função da temperatura

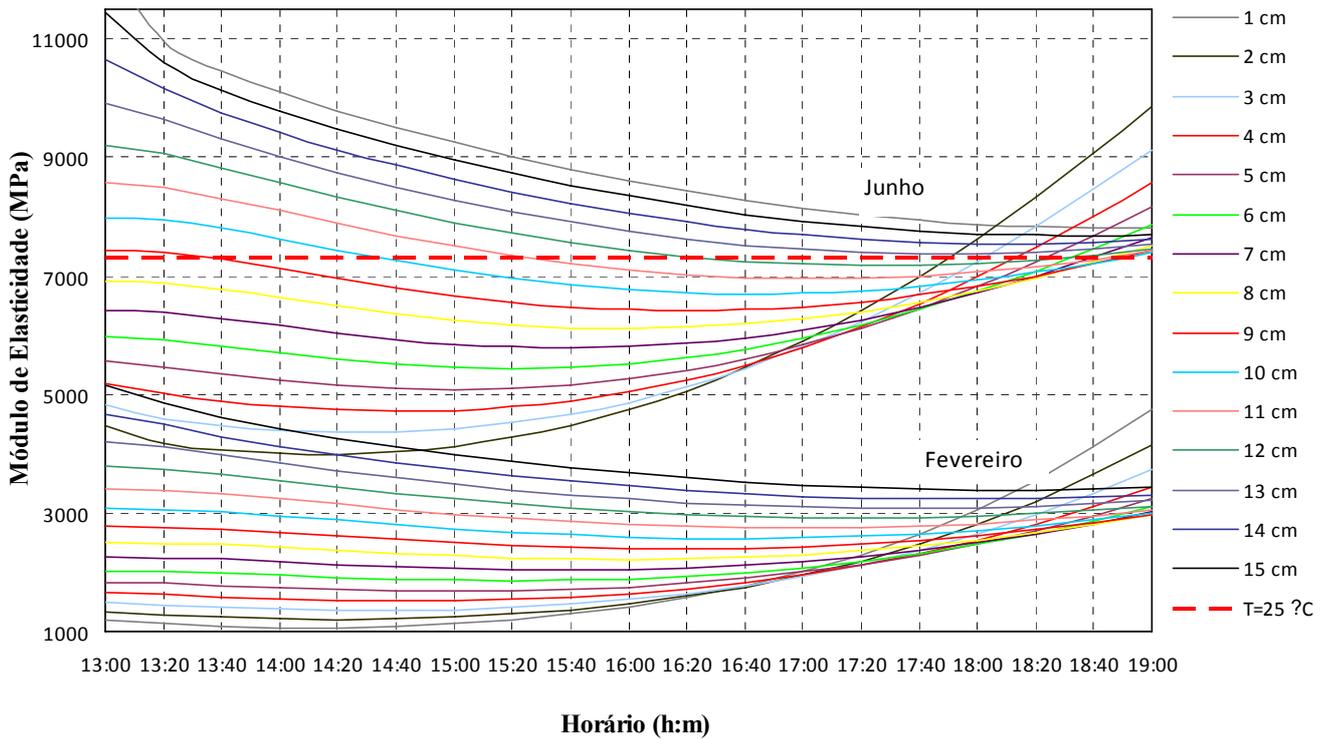


Figura 5 - Módulo de elasticidade do revestimento para os meses de fevereiro e junho

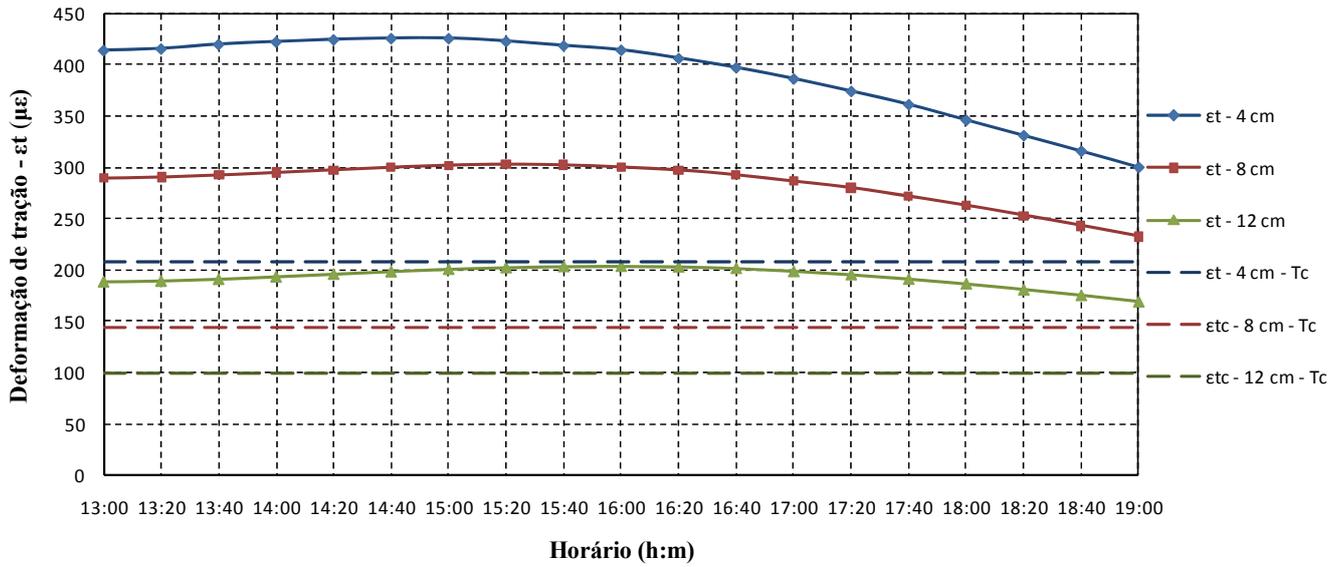


Figura 6 - Deformação de tração para o mês de fevereiro

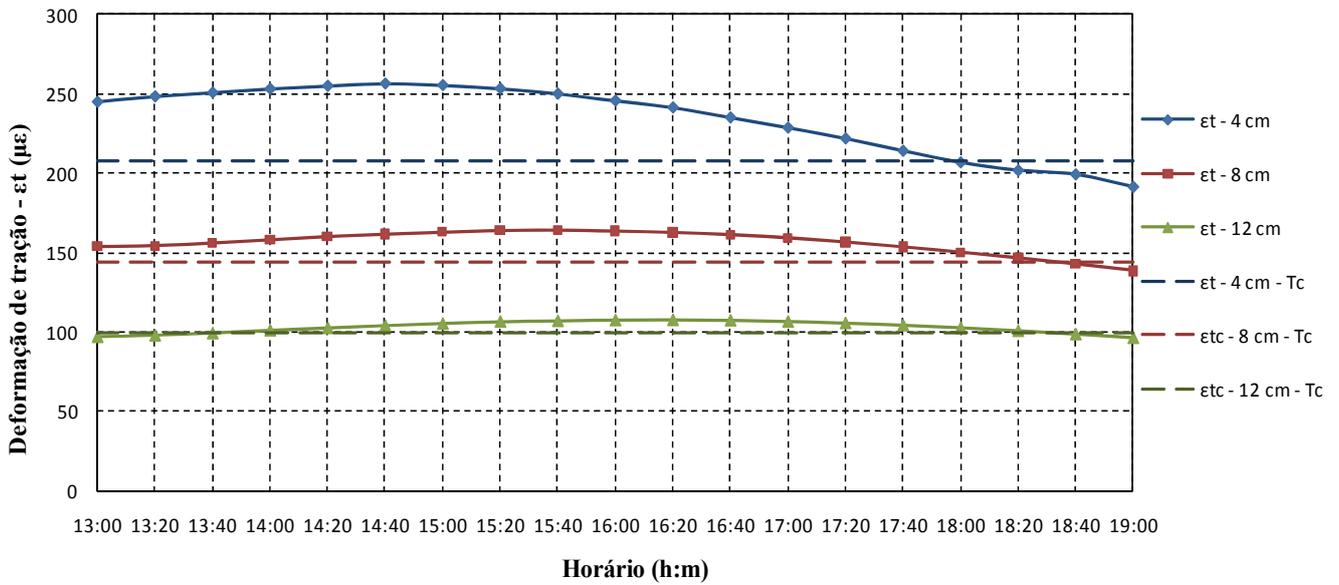


Figura 7 - Deformação de tração para o mês de junho

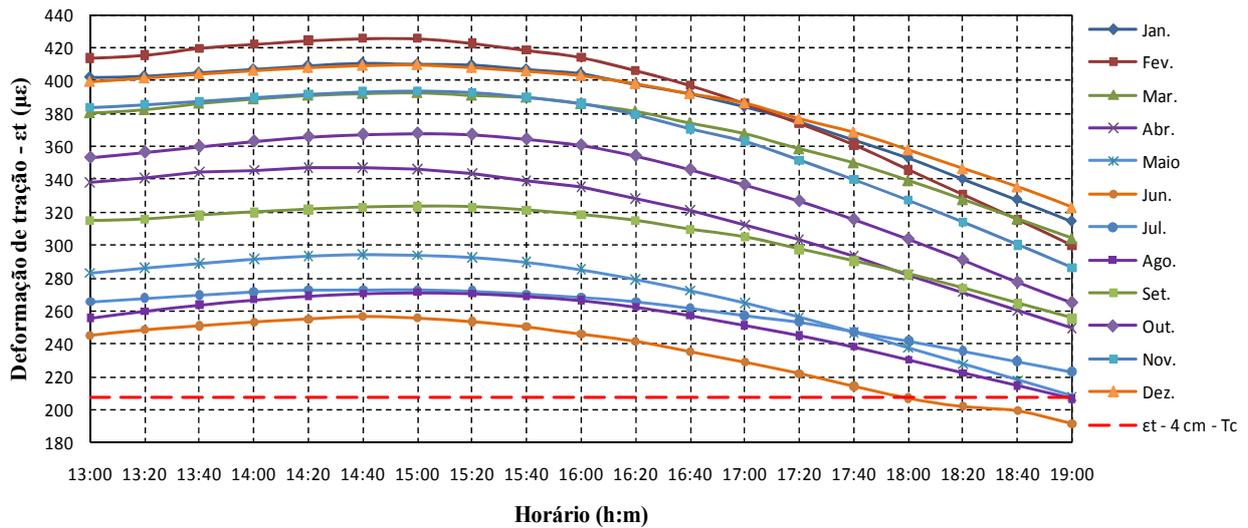


Figura 8 - Deformação de tração em revestimento de 4cm ao longo do ano

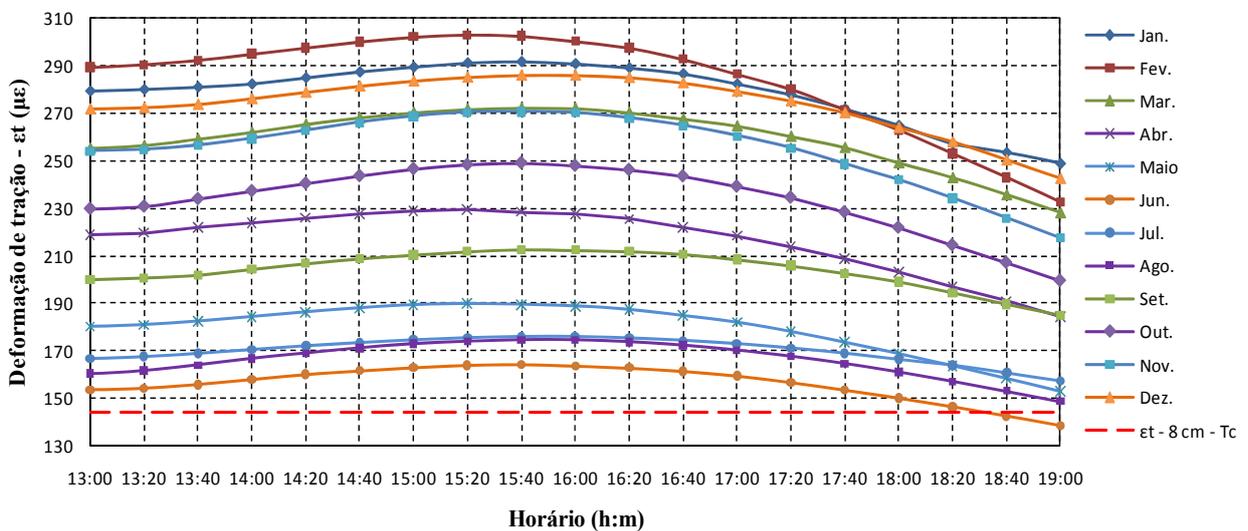


Figura 9 - Deformação de tração em revestimento de 8cm ao longo do ano

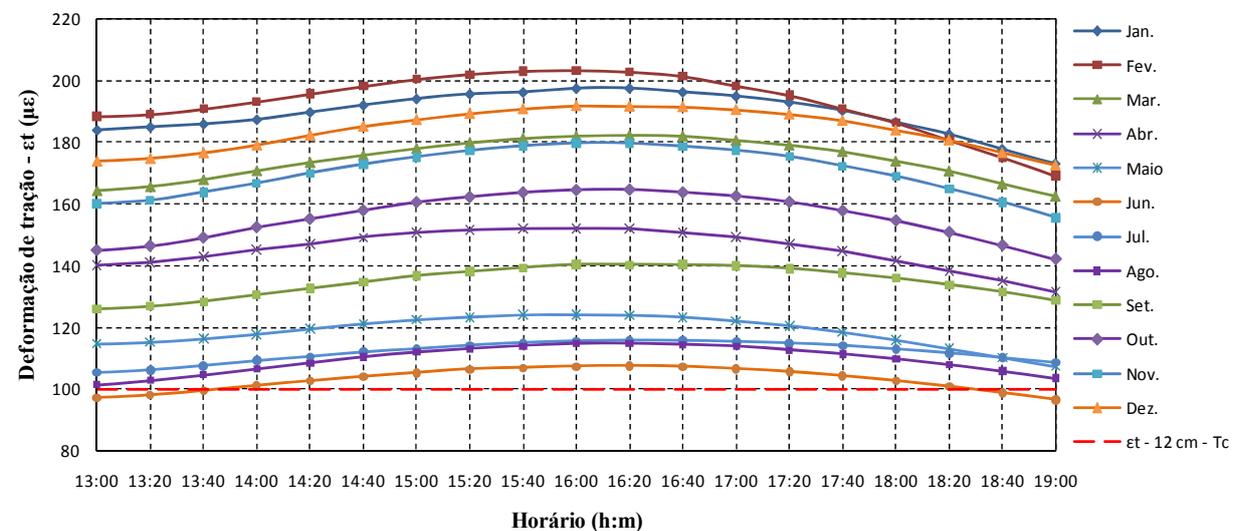


Figura 10 - Deformação de tração em revestimento de 12cm ao longo do ano