



Acta Scientiarum. Technology

ISSN: 1806-2563

eduem@uem.br

Universidade Estadual de Maringá

Brasil

Vassoler, Grazielli; Chong, Wang; Pivoto Specht, Luciano  
Comportamento mecânico de pavimentos flexíveis submetidos a gradientes térmicos  
Acta Scientiarum. Technology, vol. 33, núm. 3, 2011, pp. 265-271  
Universidade Estadual de Maringá  
Maringá, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303226532013>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe , Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# Comportamento mecânico de pavimentos flexíveis submetidos a gradientes térmicos

**Grazielli Vassoler, Wang Chong e Luciano Pivoto Specht\***

*Programa de Pós-graduação em Modelagem Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Campus Universitário, Rua do Comércio 3000, Ijuí, Rio Grande do Sul, Brasil. \*Autor para correspondência.  
E-mail: luspecht@gmail.com*

**RESUMO.** O adequado entendimento estrutural de um pavimento deve considerar, segundo a mecânica dos pavimentos, os aspectos relacionados aos carregamentos, ao meio físico e às propriedades dos materiais constituintes. No caso de materiais asfálticos, as relações entre tensão e deformação e as dependências do tempo de carregamento e da temperatura são fundamentais para o avanço no entendimento do desempenho de pavimentos flexíveis. Neste trabalho foi utilizando o método de elementos finitos para o cálculo das tensões e deformações em pavimentos flexíveis considerando variações de temperatura. Os dados de entrada incluem a rigidez dos materiais, que é função da temperatura, a qual varia com a posição e com o tempo. A temperatura do pavimento é obtida através da resolução da equação diferencial de transferência de calor aplicando a transformação de Laplace e sua inversa numérica e considerando a variação de temperatura do ambiente. A malha de elementos finitos foi gerada pelo software ANSYS® e os dados foram importados pelo software MATLAB®. No cálculo da rigidez de cada elemento da primeira camada (revestimento asfáltico), substitui-se o módulo pela média dos quatro nós, dependendo da temperatura de cada nó que por sua vez é calculada na análise de transferência de calor. O resultado mostra a grande importância dos gradientes térmicos para a análise do comportamento do pavimento, tanto no que se refere ao trincamento por fadiga quanto ao acúmulo das deformações plásticas. O uso da rigidez da camada asfáltica constante provoca resultados distantes da realidade.

**Palavras-chave:** pavimento flexível, análise mecanística, gradiente térmico.

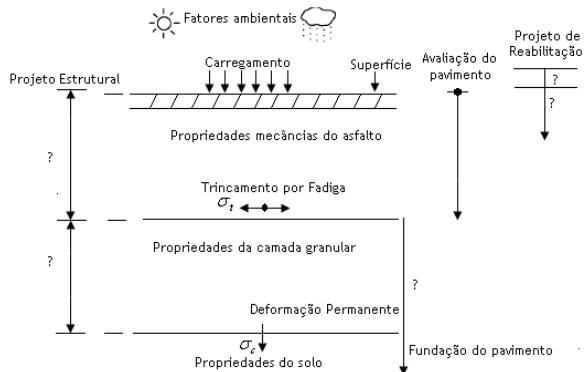
**ABSTRACT. Mechanical behavior of flexible pavements undergoing thermal gradients.** The proper structural understanding of a pavement should consider, according to the pavement mechanics, the aspects related to the traffic load, the environment and material properties. When asphaltic materials are used, the stress/strain relationships and the dependencies of load-time and temperature are key parameters for understanding flexible pavement performance. In this study, we employed the finite elements method to calculate stress/strain in flexible pavements structures considering temperature variation. The input data includes material stiffness, which is function of temperature and changes with position and time. The pavement temperature is obtained through the heat transfer differential equation, applying the Laplace transform and its numerical inversion. The finite elements grid was generated by the software ANSYS® and imported by the software MATLAB®. In order to determine the stiffness of the first layer (asphalt concrete) we used the average of four nodes, depending on the each node temperature. The result evidences the importance of thermal gradients for the pavement analysis, both for the fatigue cracking and the accumulation of plastic deformations. The use of unique modulus for asphalt concrete layer generates results far from reality.

**Keywords:** flexible pavement, mechanistic analysis, thermal gradients.

## Introdução

As rodovias brasileiras transportam 61% da carga e mais de 90% dos passageiros do Brasil representando uma das infra-estruturas mais importantes para o desenvolvimento social e econômico do país. A frota brasileira de veículos em 2000 era 19,3 milhões, o nono lugar no ranking mundial. Em 2005 este número ultrapassava 23,3 milhões (CNT, 2007).

Um pavimento pode ser definido como uma estrutura formada por múltiplas camadas capazes de suportar a ação danosa do tráfego e do meio ambiente. O desempenho de um pavimento é condicionado por um complexo conjunto de fatores, dentre eles as do tráfego atuante, o meio ambiente que está inserido e as propriedades físicas e mecânicas das camadas que o constitui, conforme ilustra a Figura 1.



**Figura 1.** Fatores intervenientes no desempenho de pavimentos.

O entendimento do pavimento segundo a teoria das camadas elásticas e da mecânica dos pavimentos nos remete à necessidade de conhecermos as propriedades de deformabilidade e de resistência dos materiais. A deformabilidade que uma camada de revestimento apresenta, conjugada a sua espessura, irão determinar a distribuição de tensões nas camadas subjacentes e, consequentemente, o comportamento à fadiga e ao acúmulo de deformações plásticas.

Outro fator que vem sendo estudado há muito tempo no processo de degradação de pavimentos é a influência dos fatores ambientais. Para tanto, torna-se indispensável o estudo das condições climáticas e ambientais relacionadas aos materiais e estruturas. Vale ressaltar que os pavimentos rígidos e flexíveis alteram seus estados de tensões e deformações quando expostos a gradientes térmicos (ALKASAWNEH et al., 2007; HUANG, 1993; MEDINA; MOTA, 2005; PRADEEP et al., 2005; SPECHT et al., 2008).

Os pavimentos possuem grandes áreas expostas às variações climáticas e ao tráfego. A variação na temperatura, o volume pluviométrico, a oxidação, e o congelamento e degelo e ainda tensões e deformações causadas pelas cargas do tráfego causam danos aos pavimentos e contribuem para a sua degradação e perda de serventia.

Como o desempenho mecânico dos pavimentos é tão sensível à temperatura, o perfil da temperatura em pavimentos em locais específicos é desejável para o adequado dimensionamento de pavimentos flexíveis. Com esta finalidade, muitos modelos matemáticos e métodos numéricos sobre transferência de calor foram propostos (WOLFE; RANDOLPH, 1993; WOLFE et al., 1995).

As variações da rigidez estão normalmente relacionadas com a temperatura média de uma camada (variações sazonais), no entanto, o gradiente de temperatura dentro da camada (variações diárias) também tem um papel importante nessa relação temperatura/rigidez o que, pelas simplificações do projeto muitas vezes é negligenciada.

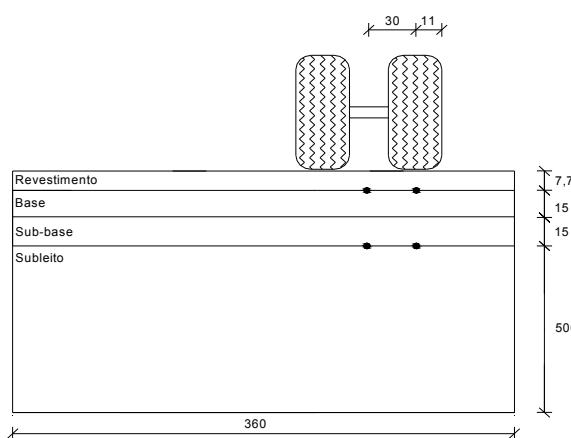
O artigo apresenta resultados de simulações numéricas a partir do desenvolvimento de um programa utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF) para o cálculo de tensões e deformações em estruturas de pavimentos flexíveis e considerando os gradientes térmicos; para análise foram considerados pontos de interesse: a fibra inferior da camada de revestimento onde se inicia o processo de trincamento por fadiga e o topo do subleito, visando sua proteção, a fim de evitar as deformações permanentes excessivas.

## Material e métodos

Neste trabalho foram determinadas as variações das temperaturas em função da profundidade (para  $n$  camadas) e do tempo ( $t$ ) desenvolvendo-se um programa que calcula a temperatura em  $n$  camadas de um pavimento sob a variação da temperatura ambiente.

A partir da equação diferencial de transferência de calor utilizando a transformação de Laplace (inversa numérica da transformação de Laplace) obtém-se um sistema de equações lineares; seus coeficientes envolvem condições de contorno (superfície e fundo do pavimento) e condições de conexão entre as camadas vinculadas. Os resultados da distribuição da temperatura são dependentes da profundidade e do tempo (ou horário). Este método foi desenvolvido originalmente por Tramontini (2007) para duas camadas e transformado nesta pesquisa em uma solução para  $n$  camadas. Tal solução é apresentada por Chong et al. (2009) para duas camadas e por Vassoler (2009) para  $n$  camadas.

O modelo estrutural de pavimento utilizado está apresentado na Figura 2; é possível observar os pontos de maior interesse do conhecimento dos estados de tensões/deformações: em profundidade, na fibra inferior da camada de revestimento e no topo da camada do subleito e, lateralmente, entre as rodas (centro do semi-eixo) e embaixo de uma das rodas.



**Figura 2.** Modelo estrutural de pavimento.

O carregamento utilizado foi um semi-eixo de rodas duplas (carregamento de 41 kN) com carga de 20,50 kN por roda. As áreas carregadas foram consideradas circulares com diâmetros de 22 cm e tensão de contato de 560 kPa. A malha gerada foi a quarta parte da pista de rolamento, considerando a simetria com a outra meia pista.

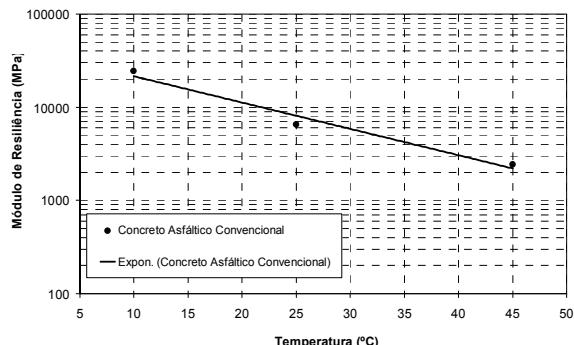
A camada de revestimento que possui 7,7 cm de espessura e foi dividida em 7 finas camadas de 1,1 cm. A camada de base, que possui 15 cm foi dividida em 3 camadas de 5 cm. A camada de sub-base também com 15 cm tem 2 divisões de 7,5 cm. A camada de subleito com 5 m de profundidade possui 2 divisões. As condições de contorno neste caso tridimensionais, supõem deslocamentos nulos nas fronteiras  $x$ ,  $y$  e  $z$ , ou seja  $u=v=w=0$ .

Specht (2004) apresentou a avaliação da rigidez de uma mistura em concreto asfáltico (CA) em diferentes temperaturas, conforme medidas (médias de três determinações) apresentadas na Tabela 1 e na Figura 3. Estas relações serão utilizadas nesta pesquisa para relacionar a rigidez do revestimento com a temperatura.

**Tabela 1.** Valores da rigidez do CA em diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Módulo de Resiliência (MPa)
10	24370
25	6510
45	2427

Fonte: Specht (2004).



**Figura 3.** Rigidez do concreto asfáltico em função da temperatura.

O concreto asfáltico em estudo trata-se de um CA denso (faixa IV B do Instituto do Asfalto) com 4,00 de volume de vazios, 4,75% de ligante CAP 20, 15,8% de vazios de agregado mineral e 75% de relação betume/vazios. Foi preparado com agregados basálticos e areia de várzea da região metropolitana de Porto Alegre, Estado do Rio Grande do Sul, comumente utilizados em obras de pavimentação.

Para o ajuste de dados foi gerado um modelo do tipo exponencial, que correlaciona

$M_R$  (Módulo de Resiliência) *versus* T, a partir da média de três ensaios em cada temperatura, conforme apresentado na equação 1. O  $R^2$  da equação de ajuste foi de 0,97.

$$M_R = 41186e^{-0,065T} \quad (1)$$

O coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) de um elemento na camada de revestimento é obtida da mesma maneira usando os dados apresentados na Tabela 2 e ajustados na equação 2. Os dados foram obtidos na norma BSI-British Standards DD213 (BSI, 1993).

**Tabela 2.** Valores do coeficiente de Poisson em diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Coeficiente de Poissin - $\nu$
10	0,10
25	0,30
45	0,45

Fonte: BSI (1993).

$$\nu = 0,5(1 - e^{-0,0369T}) \quad (2)$$

A obtenção de tensões e deformações é através da programação pelo Método de Elementos Finitos (MEF) para um problema típico de elasticidade tridimensional. A diferença entre esse trabalho e outros clássicos é que no cálculo da rigidez e do coeficiente de Poisson de cada elemento da primeira camada (revestimento betuminoso) substitui-se o módulo de elasticidade pela média das resiliências dos 4 nós, os quais foram obtidas pela equação 1, dependendo da temperatura de cada nó que por sua vez é calculadas na análise de transferência de calor.

As propriedades dos materiais das camadas utilizadas para a programação estão apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3.** Propriedades das camadas do pavimento utilizado.

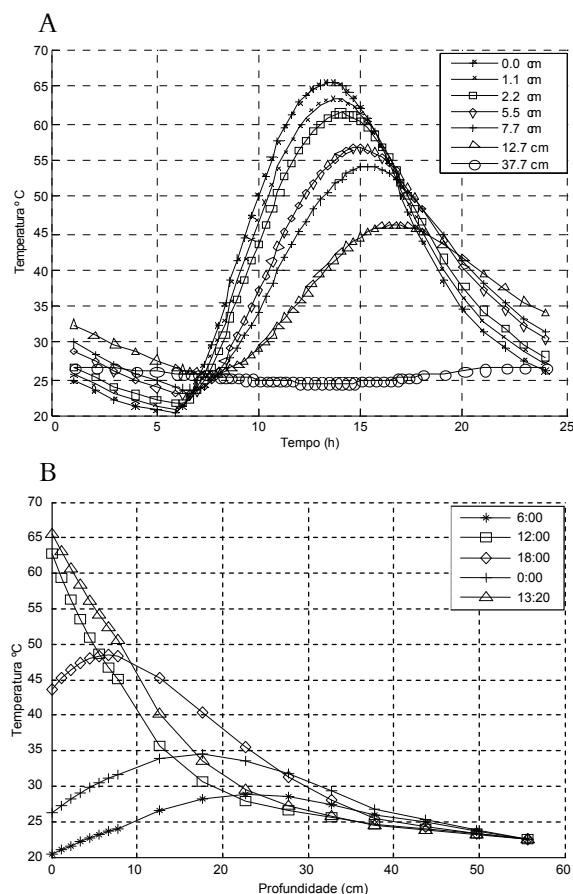
	Revestimento Concreto Asfáltico	Camada de base	Camada de sub-base	Subleito
Condutividade térmica ( $J m s^{-1} C$ )	$k_1 = 1,212^{(1)}$	$k_2 = 0,695$	$k_2 = 0,695$	$k_3 = 1,5$
Calor específico ( $J kg^{-1} C$ )	$C_{p1} = 920^{(1)}$	$C_{p2} = 800$	$C_{p2} = 800$	$C_{p3} = 800$
Densidade ( $kg m^{-3}$ )	$\rho_1 = 2240^{(1)}$	$\rho_2 = 1500$	$\rho_2 = 1500$	$\rho_3 = 1700$
Difusividade ( $10^{-7} m^2 s^{-1}$ )	$\alpha_1 = 5,88$	$\alpha_2 = 5,79$	$\alpha_2 = 5,79$	$\alpha_3 = 11,72$
Módulo de Elasticidade (MPa)	$M_R = 8110^{(2)}$	$M_R = 350$	$M_R = 150$	$M_R = 75$
Coeficiente de Poisson (adm.)	$\nu = 0,30^{(2)}$	$\nu = 0,32$	$\nu = 0,33$	$\nu = 0,35$

Nota: <sup>1</sup>Medina (1997); <sup>2</sup>valor correspondente ao CA à 25°C.

## Resultados e discussão

### Resultado da distribuição da temperatura

A Figura 4A mostra as variações das temperaturas em função das profundidades ao longo do dia. Observando o comportamento da temperatura da superfície em relação às demais profundidades, conclui-se que ao nascer do sol (6h) o gradiente térmico no pavimento é positivo na primeira camada e negativo em parte da segunda camada. Isso indica que o fluxo de calor vem do interior da estrutura para o ambiente. Este fenômeno é contrário às 12h onde o fluxo de calor do ambiente para dentro da estrutura é predominante.



**Figura 4.** Variações da temperatura do pavimento A) em função da profundidade; B) em função do tempo.

Pelas Figuras 4A e B fica evidente que a variações da temperatura dependem da profundidade: menores profundidades implicam em maiores gradientes térmicos. A temperatura máxima ocorre na superfície do pavimento às 13h 20 min. atingindo 65°C e a mínima temperatura de 20,5°C ocorre às 6h. É importante salientar que, se considerado o revestimento como um todo o pico de temperatura acontece entre 13h 20 min. (para a superfície) e 15h 20

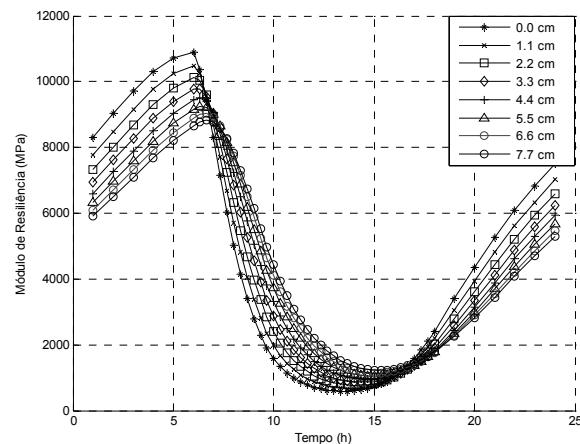
min. (para o fundo da camada de revestimento). Se observarmos o gradiente térmico no topo do subleito (37,7 cm) nota-se uma variação de apenas 3°C.

Na superfície do revestimento a temperatura variou 44,4°C em 7 horas, ou seja, houve uma taxa de incremento de 6,28°C por hora. Essa taxa no fundo do revestimento é de 4,28°C por hora, variando 30°C em 8 horas.

Esses dados estão de acordo com a literatura, já que Motta (1991) cita medições de até 65°C na superfície do pavimento, no Rio de Janeiro. Tramontini (2007) mostra que a temperatura máxima na superfície do pavimento flexível é de 63,1°C às 13h 30 min. em Ijuí, Estado do Rio Grande do Sul.

### Análise da rigidez do revestimento em função do tempo

Na Figura 5 pode-se observar que a rigidez varia, consideravelmente, com o decorrer do dia, consequência da variação de temperatura. Na superfície, por exemplo, quando a temperatura varia de 20,5 a 65°C a rigidez do CA varia de 10900 a 600 MPa. No fundo da camada de revestimento (7,7 cm de profundidade) a rigidez varia de 8800 a 1250 MPa enquanto que a temperatura varia de 23 a 54°C.



**Figura 5.** Módulo de rigidez em diferentes profundidades da camada de revestimento.

Segundo a Equação 1, um gradiente de temperatura de 5°C pode resultar em uma variação da rigidez da ordem de 70%. Esta simplificação, de considerar a rigidez constante, torna-se mais ou menos importante dependendo do ambiente em que o pavimento estiver inserido; em regiões em que são constatadas variações climáticas significativas é de se supor que a adoção da rigidez a 25°C conduzirá a valores de tensões e deformações bastante equivocados.

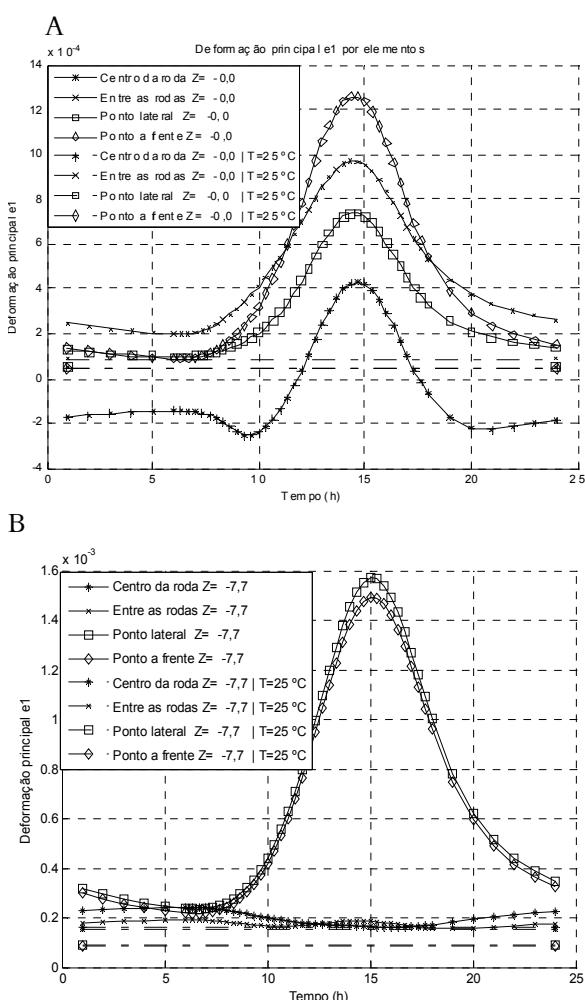
### Análise do comportamento mecânico do pavimento

A análise de tensões e deformações por elementos finitos elaborada nesse trabalho é dividida em dois cálculos. No primeiro, foi empregado um valor de rigidez constante, cujo valor foi de 8110 MPa, calculado pela Equação 1 e correspondendo à temperatura de 25°C do CA. O segundo cálculo considerou a influência das variações da temperatura, e consequentemente, as variações da rigidez e do coeficiente de Poisson na camada de revestimento.

#### Deformação principal 1

Os esforços cíclicos de tração, e suas deformações, dão origem ao fenômeno da fadiga e aos trincamentos, assim torna-se relevante investigar sua magnitude e variação.

A Figura 6A mostra a distribuição deformação principal 1 na superfície.



**Figura 6.** Deformação principal 1 no revestimento: A) na superfície; B) fundo da camada.

Pode-se observar que a máxima (1280 με) está no ponto da frente da impressão do pneu quando a temperatura é alta e a mínima (100 με) quando a temperatura está baixa. A diferença é de 1180 με mas mantendo o sinal positivo (tração); no centro do pneu a máxima é de 400 με e a mínima é de -240 με. Contudo quando a roda avança e alcança o ponto da frente esse passa a ser o novo centro. Então, para um ponto na trajetória do centro do pneu a deformação principal 1 varia de -240 με a 1280 με. Essas variações tanto na amplitude quanto no sinal são fundamentais para a análise de fadiga do pavimento, principalmente no caso de trincas tipo *top-down*.

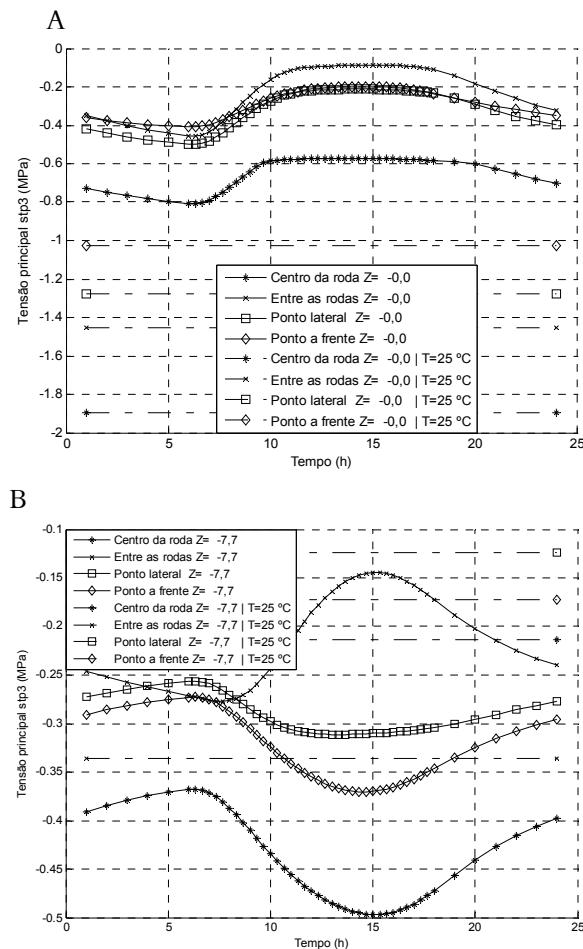
Claramente, as distribuições de deformação variam bastante com a temperatura. Isto é bem diferente quando se utiliza os parâmetros como módulo Young e a coeficiente de Poisson constantes (observando as linhas retas na Figura 6A).

No fundo da camada de revestimento, conforme Figura 6B, pode-se observar que um ponto no perímetro da impressão do pneu tem a deformação bem maior do que no centro. Para um ponto lateral chega a 1600 με. No centro do pneu e entre os dois centros a variação é muito pequena. Então não podemos ignorar o efeito da deformação principal 1 no perímetro da impressão.

#### Tensão principal 3

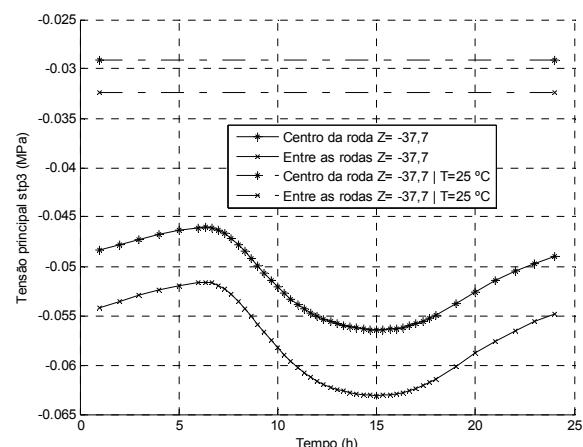
A tensão principal 3 (tensão de compressão) é de extrema relevância para a análise das deformações permanentes em estruturas de pavimentos. Na Figura 7A podemos observar a grande importância de se considerar os gradientes térmicos quando comparam-se as curvas com as linhas retas (temperatura constante). No caso dos resultados com gradientes térmicos há pouca diferença na distribuição de tensão principal 3 na superfície do pavimento. No centro da roda, a tensão variou de -0,8 para -0,58 MPa. Pode-se observar também que entre as rodas há maior variação: de -0,45 a -0,09 MPa.

Na Figura 7B estão plotados os resultados de tensão principal 3 na fibra inferior do revestimento. Podemos observar que há diferença na distribuição da tensão principal 3, principalmente no centro entre as rodas, que varia de -0,15 a -0,24 MPa. Isto porque no centro entre as rodas não há pressão. Nos pontos onde há pressão, a variação da tensão principal 3 é: centro da roda: -0,35 a -0,50 MPa; ponto a frente: -0,25 a -0,35 MPa; e ponto lateral: -0,35 a -0,30 MPa.



**Figura 7.** Tensão principal 3 no revestimento: a) na superfície; b) fundo da camada.

Pode-se observar na Figura 8 que no topo do subleito a distribuição das tensões é semelhante, de forma senoidal para o centro da roda e o centro entre as rodas.



**Figura 8.** Tensão principal 3 no topo do subleito.

A máxima compressão acontece entre as rodas e é de 0,063 MPa e a mínima compressão é 0,052 MPa e

acontece próximo das 15 horas. Esta é uma tensão muito importante de ser observada em projeto de pavimento pois ditará a compressão na camada mais suscetível a deformações plásticas, o subleito. A diferença entre a análise com e sem gradientes térmicos é bastante importante passando de 0,032 para 0,063 MPa (as 15 horas no centro da roda).

## Conclusão

As máximas temperaturas observadas na simulação acontecem na superfície do pavimento por volta das 13 horas 20 min. enquanto que as máximas tensões acontecem por volta das 15h indicando que nesse período existe um importante fluxo de calor para o interior do revestimento reduzindo bastante sua rigidez.

A partir dos valores calculados será também possível a aplicação de funções de transferência ou modelos de previsão de desempenho associando o tráfego ao horário e ao dano causado pela passagem de veículos.

Como o desempenho mecânico dos pavimentos é tão sensível ao meio ambiente, o perfil da temperatura em pavimentos em locais específicos é desejável para dimensionamento e análise de pavimentos flexíveis. Com essa finalidade, modelos matemáticos e métodos numéricos de transferência de calor acoplados a análise de tensões e deformações podem contribuir de sobremaneira no entendimento e nas aplicações da Mecânica dos Pavimentos.

## Referências

- ALKASAWNEH, W.; PAN, E.; HAN, F.; ZHU, R.; GREEN, R. Effect of temperature variation on pavement responses using 3D multilayered elastic analysis. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 8, n. 3, p. 203-212, 2007.
- BSI-British Standards Institution. **Determination of the indirect tensile stiffness modulus of bituminous mixtures**. DD213. London, 1993. p. 16.
- 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, n. 11, p. 1004-1018, 2009.
- CNT-Confederação Nacional do Transporte. **Boletim Estatístico**. 2007. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br>>. Acesso em: 30 jun. 2010.
- HUANG, H. Y. **Pavement analysis and design**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.
- MEDINA, J. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005.

- MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis, critérios de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas.** 1991. 366f. Tese (Doutorado em Ciências)-Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.
- PRADEEP, H.; KRISHNAN, J. M.; RAJAGOPAL, K. R.; LITTLE, D. N.; MASAD, E. Modelling constant displacement rate experiments of asphalt concrete using a thermodynamic framework. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 6, n. 4, p. 241-256, 2005.
- SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus.** 2004. 279f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- SPECHT, L. P.; BORGES, P. A.; HELMANN, L. Determinação das propriedades térmicas de concretos asfálticos com diferentes tipos de ligantes. **Revista Tecnologia**, v. 29, n. 2, p. 198-210, 2008.
- TRAMONTINI, R. **Modelagem matemática da transferência de calor em pavimentos rígidos e flexíveis.** 2007. 87f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática)-Departamento de Tecnologia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2007.
- VASSOLER, G. **Análise numérica do comportamento mecânico dos pavimentos submetidos à variação de temperatura.** 2009. 123f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática)-Departamento de Tecnologia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2009.
- WOLFE, R. K.; BRIAN, W. R.; COLONY, D. C. Standardized elastic moduli pavement layers for overlay design. **Journal of Transportation Engineering**, v. 21, n. 2, p. 221-232, 1995.
- WOLFE, R. K.; RANDOLPH, B. W. **Temperature adjustment of dynamic deflection measurements of asphalt concrete pavements.** Columbus: Department of Transport, 1993. (Report FHWA/OH-93/010).

Received on August 9, 2010.

Accepted on January 26, 2011.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.