

SENSIBILIDADE DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS ÀS VARIACIONES DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE

Luís Henrique Cardoso Alexandre (UEL) luish_alexandre@hotmail.com

Susane Andressa Masi Alves (UEL) susanealves@hotmail.com

Paula Conde Santos Borba (UEL) paulacsborba@gmail.com

Thaís Ferrari Réus (UEL) thaifsferrari@uel.br

Raquel Souza Teixeira (UEL) raquel@uel.br

Carlos Alberto Prado da Silva Júnior (UEL) cprado@uel.br

Heliana Barbosa Fontenele (UEL) heliana@uel.br

Resumo: Devido às limitações dos métodos empíricos para o dimensionamento de pavimentos, tem-se observado a tendência de substituição destes por métodos empírico-mecanísticos, que proporcionam análises mais fidedignas e representativas da situação vivida em campo. Nessa pesquisa foi conduzida uma análise de sensibilidade dos pavimentos flexíveis, levando em consideração a variação dos módulos de elasticidade (E) das camadas. O objetivo foi investigar o efeito que tais variações provocam nas respostas estruturais e o conseqüente desempenho dos pavimentos. Para tanto, as deformações relativas às principais formas de deterioração dos pavimentos (trincas por fadiga e afundamento nas trilhas de rodas) foram calculadas a partir do uso do programa computacional ELSYM. Foram utilizados os espectros de carga por eixo desenvolvidos por Fontenele (2011). Os fatores de equivalência de carga (FEC), os fatores de veículos (FV) e o número equivalente de solicitações do eixo padrão (N) foram calculados e comparados de acordo com as variações propostas considerando as deformações obtidas. A partir dos resultados concluiu-se que os pavimentos flexíveis considerados neste experimento apresentam sensibilidade à variação do módulo de elasticidade das camadas. O surgimento das trincas por fadiga está mais relacionado à variação do E da base, enquanto que os afundamentos nas trilhas de rodas estão mais relacionados à variação do parâmetro na camada de sub-base e no subleito.

Palavras-chave: dimensionamento de pavimentos, método empírico-mecanístico, ELSYM5.

SENSITIVITY OF FLEXIBLE PAVEMENTS TO ELASTICITY MODULUS VARIATION

Abstract: Due to limitations of empirical pavement design methods, it has been observed the trend of replacing them with mechanistic-empirical methods that provide more reliable and representative analysis of the situation in the field. In this study we conducted a sensitivity analysis of flexible pavements, taking into account the variation of the modulus of elasticity (E) of the layers. The objective was to investigate the effect that such variations cause in the structural responses and in the pavement performance. For this, the deformations related to the main forms of deterioration of pavements (fatigue cracking and rutting) were calculated from the use of the computer program ELSYM5. The axle load spectra developed by Fontenele (2011) were used. The Load Equivalency Factor (FEC), Vehicle Factor (FV) and Equivalent Standard Axle Load (N) were calculated and compared according the variations suggested considering the deformations calculated. From the results it can be concluded that there is a greater sensitivity in flexible pavements to the variation of the modulus of elasticity of the layers. The emergence of fatigue cracking is related to the base elasticity modulus variation, while rutting is more related to variation of this parameter on sub-base and sub grade layers.

Keywords: pavement design, empirical-mechanistic method, ELSYM5.

1. INTRODUÇÃO

O pavimento é uma estrutura composta por diferentes camadas, destinada a dar condições adequadas ao tráfego, proporcionando ao usuário conforto, segurança, economia e agilidade. No início da vida útil de um pavimento estas condições se encontram ótimas, porém no decorrer de sua utilização o pavimento tende a deteriorar-se, diminuindo a qualidade das condições de rodagem. Segundo a AASHTO (1990), o termo “desempenho” de um pavimento é utilizado para expressar a capacidade deste de atender seus objetivos ao longo do tempo.

Para a pavimentação de rodovias, encontram-se dois principais tipos de pavimento: o rígido, construído em concreto de cimento portland, e o flexível, feito em material betuminoso. No Brasil, o tipo de pavimentação mais encontrado em rodovias é o pavimento flexível, revestido com material asfáltico, sendo que este possui custo de implantação mais baixo, quando comparado com pavimento rígido, porém apresenta desgaste mais acentuado, necessitando de intervenções para reparos mais recorrentes. Portanto, neste trabalho, a estrutura usada para análise de sensibilidade foi a de um pavimento flexível.

1.1 Deterioração do pavimento

Diversos fatores contribuem para a degradação do pavimento, entre eles fatores ambientais e climáticos, qualidade dos materiais utilizados e da execução, e as cargas impostas pelo tráfego rodoviário. De uma forma geral, as principais deteriorações no pavimento são: trincas por fadiga; afundamento nas trilhas de rodas; trincas térmicas e irregularidade longitudinal.

Neste trabalho serão analisados os danos estruturais causados pelo tráfego: trincas por fadiga e afundamento nas trilhas de rodas. Estes danos são causados, respectivamente, por deformações horizontais de tração na fibra inferior do revestimento ($\epsilon_{ht,1}$) e deformações verticais de compressão no topo do subleito ($\epsilon_{vt,1}$).

Segundo Fontenele (2011), as formas de deterioração não dependem somente da magnitude da carga aplicada, mas também das características dos materiais constituintes das camadas do pavimento, da geometria do carregamento e da pressão de enchimento dos pneus.

1.2 Dimensionamento de pavimentos

De acordo com DNIT (2006), os pavimentos são dimensionados para durarem determinados períodos, designados por ciclos de vida. Ao longo do ciclo de vida o pavimento tende a deteriorar-se, reduzindo a qualidade de uso, conforme este é solicitado pelas cargas impostas pelo tráfego rodoviário.

Para o dimensionamento existem os métodos empíricos e os métodos empírico-mecanísticos (E-M). Carvalho e Schwartz (2006) definiram os métodos empíricos como aqueles baseados unicamente nos resultados experimentais ou na experiência. Já os métodos empírico-mecanísticos são a união de teorias da mecânica com o empirismo: determinações das respostas estruturais dos pavimentos (tensões, deformações e deflexões) devido à influência das cargas e do ambiente, unidas às correlações dessas respostas com o desempenho do pavimento via modelos empíricos de deteriorações.

No dimensionamento por métodos E-M, utiliza-se de ferramentas como programas computacionais para cálculo de tensões e deformações no pavimento. Parte-se de uma estrutura pré-dimensionada em que são inseridas as características dos materiais constituintes das camadas, as cargas de tráfego, a pressão de enchimento dos pneus, os dados climáticos, entre outros, dependendo do refinamento do programa. Com os resultados, verifica-se se o dimensionamento prévio atende aos requisitos de projeto ou se serão necessárias alterações na estrutura do pavimento e novo processamento de dados (Fontenele, 2011).

1.2 Utilização de métodos empírico-mecanísticos

Devido à maior abrangência possibilitada pelos métodos empírico-mecanísticos, estes tendem a apresentar resultados mais fidedignos que os empíricos, o que justifica a tendência daqueles métodos serem cada vez mais utilizados.

Um dos métodos E-M mais recentes foi proposto pelo National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), no projeto 1-37A (NCHRP, 2004). Conhecido inicialmente como Método AASHTO 2002. Este método trouxe um novo conceito para caracterização do tráfego: os espectros de carga por eixo (Axle Load Spectra).

Shanji (2006), utilizando o método AASHTO 2002, analisou a sensibilidade de pavimentos a para alguns parâmetros de projeto, tais como: tráfego e propriedades das camadas. As propriedades das camadas consideradas foram espessura e módulo de elasticidade. As análises também foram feitas tanto para pavimentos rígidos quanto flexíveis e geraram comparações para diferentes tipos de dano ao pavimento. Masad (2004) em seu trabalho, utilizando o mesmo método analisou a sensibilidade à variações de propriedades nas camadas granulares de base e sub-base, avaliando também os danos referentes a trincas por fadiga, afundamentos, etc.

Neste trabalho, foi feita a análise da sensibilidade de pavimentos em função das alterações da espessura da base e do módulo de elasticidade da sub-base, utilizando-se de uma abordagem empírico-mecanística.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Tráfego

As respostas estruturais, de um pavimento flexível, ocasionadas pelo tráfego rodoviário serviram de base para a análise de sensibilidade proposta nesse trabalho.

Desta forma, foram utilizadas as cargas relativas aos espectros de carga por eixo desenvolvidos por Fontenele (2011). Estes espectros de carga referem-se aos dados de pesagem, do ano de 2008, de um posto de controle e fiscalização localizado no estado de São Paulo, no km 28 da Rodovia dos Imigrantes. Foram consideradas também as classes de veículos classificados pelo DNIT (2007) com maior frequência na via.

O período de projeto do pavimento considerado foi de 20 anos e a taxa linear de crescimento de tráfego de 4% a.a.

2.2 Cálculo das deformações

Foram analisadas as deformações ocasionadas por cargas pré-estabelecidas, provenientes do posto de pesagem anteriormente citado. As deformações analisadas foram na fibra inferior do revestimento ($\varepsilon_{ht,1}$) e no topo do subleito ($\varepsilon_{vt,1}$).

As simulações foram realizadas no programa ELSYM 5, variando apenas as cargas por eixo para os parâmetros estudados. A tabela 1 apresenta as características estruturais do pavimento utilizadas para a análise de sensibilidade. A camada número 1 refere-se ao revestimento e a de número 2 e 3 à base e sub-base, respectivamente.

Tabela 1 - Características do pavimento.

Camadas	Espessura (cm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coef. de Poisson
1	12,5	4000	0,3
2	20,0	276, 345, 400 e 483	0,4
3	25,0	186, 197, 200 e 217	0,4
Subleito	∞	48, 59, 70 e 79	0,45

2.3 Cálculo dos fatores de danos

A partir das respostas estruturais obtidas no ELSYM 5, foram calculados os fatores de equivalência de carga empírico-mecanísticos (FEC), que relacionam os danos provocados pela passagem de cada eixo dos veículos considerados com aqueles causados pela passagem do eixo padrão de 8,2 t. Foram obtidos valores de fator de equivalência de carga, $FEC_{trincas}$, a qual faz referência às deformações horizontais de tração na fibra inferior do revestimento e de $FEC_{afundamentos}$, referente às deformações verticais de compressão no topo do subleito.

O cálculo dos FEC apresentados foi feito de acordo com a Equação (1), onde a razão é elevada pelos valores 3,291 e 4 para trincas e afundamentos, respectivamente.

$$FEC_i = \left(\frac{\rho_i}{\rho_0} \right)^b \quad (1)$$

Onde: ρ_i é a resposta estrutural correspondente à solicitação em análise; ρ_0 é a resposta estrutural referente à solicitação padrão; b é referente à forma de deterioração, à resposta estrutural, ao tipo de ensaio e à estrutura analisada.

Com a somatória dos valores de FECs de cada eixo componente nos veículos, obteve-se o fator de veículo (FV) individual de cada classe para ambas as deteriorações. Ao multiplicar esses valores pela respectiva frequência das classes de veículos, foi possível obter os valores de FV médio da frota.

2.4 Cálculo da vida útil

O cálculo da vida útil do pavimento é feito através do parâmetro “N”, que corresponde ao número de repetições do eixo padrão durante o período de projeto, no caso 20 anos.

Para obtenção desse valor, primeiramente obteve-se o volume de tráfego por meio da Equação (2).

$$V_n = V_0 + n \times t \quad (2)$$

Onde: V_n é o volume de tráfego; V_0 é volume de tráfego no ano base; n representa número de anos decorridos após o ano base; t a taxa linear de crescimento anual do tráfego.

O valor de “N” relativo a cada ano “a” foi obtido pela Equação (3).

$$N_a = 365 \times FV \times V_n \times c \quad (3)$$

Em que: FV é o fator de veículo; V_n é o volume de tráfego; c é o fator de distribuição de veículos comerciais em relação ao tráfego, nos dois sentidos, na faixa de projeto. O valor de “c” adotado foi 48%, limite superior da faixa recomendada pelo DNIT (2006) para o tipo de rodovia encontrado.

Finalmente, com a Equação (4), obteve-se o valor de “N” empírico-mecanístico no 20º ano de projeto, denominado “N2028”.

$$N = \sum_{a=1}^{a=p} N_a \quad (4)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Variação do módulo da base

Com a variação do módulo de elasticidade da base, em relação ao FV empírico-mecanístico médio da frota, representado na Figura 1, pode-se observar que o defeito trinca por fadiga tem um acréscimo de 6,65% conforme o módulo de elasticidade da base passa de 276 a 483 MPa. Já o defeito afundamento sofre um acréscimo de 4,89% conforme E varia de 276 a 400 MPa, mas logo em seguida o FV cai 4,37% para E de 400 e 483 MPa.

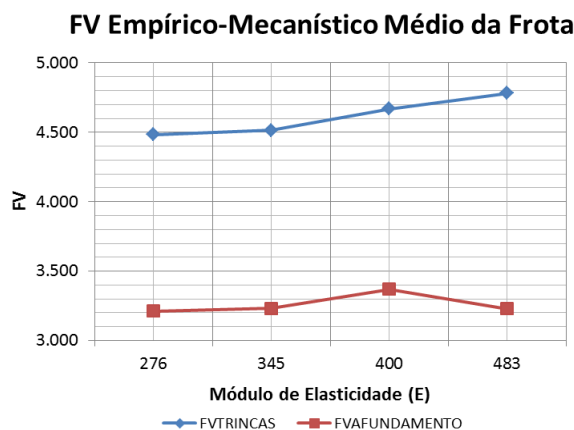


Figura 1 - Variação de FV médio da frota conforme E da base.

Analisando o número de solicitações equivalentes N2028, relativo ao acumulado nos 20 anos de projeto, conforme observado na Figura 2, o valor de N relativo ao defeito trinca por fadiga sofre um aumento de 28,34% quando E varia de 276 a 483 MPa. No caso do defeito por afundamento na trilha da roda, há um aumento de 4,90% para E variando de 276 a 400 MPa, e em seguida cai 4,17% quando E varia de 400 a 483 MPa. Observa-se que exceto pela estrutura que contém a camada base com E de 400 MPa, os danos causados pelo defeito afundamento na trilha de rodas das outras estruturas são praticamente constantes.

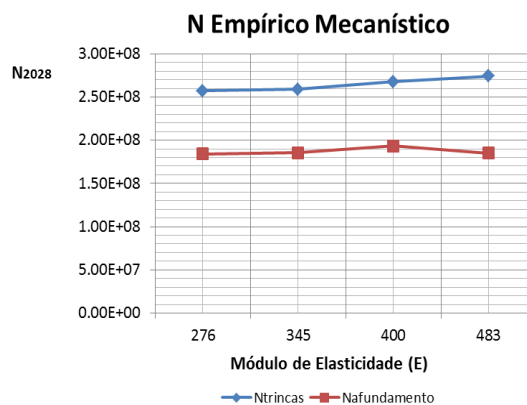


Figura 2 - Variação de N2028 conforme E da base.

3.2 Variação do módulo da sub-base

Com relação à variação do módulo de elasticidade da sub-base, verificou-se que os valores de FV médio da frota aumentam ao variar o módulo de 186 a 200 MPa e tendem a diminuir com o módulo alcançando 217 MPa. Para danos referentes a trincas, o aumento do valor de FV médio observado foi de 2,2%, enquanto que para afundamentos o crescimento foi de 3%, indicando assim que o pavimento possui baixa sensibilidade à variação no módulo da sub-base, conforme observado na Figura 3.

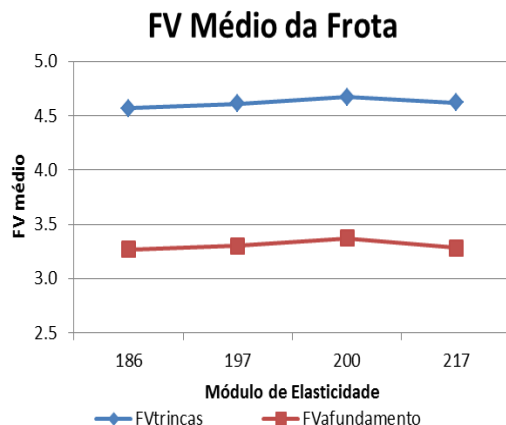


Figura 3 - Variação do FV médio da frota conforme E da sub-base.

Com relação ao número de solicitações equivalentes N2028, conforme indicado na Figura 4, o dano acumulado também aumenta ao variar o módulo de 186 a 200 MPa, decrescendo conforme o módulo passa a 217 MPa. Neste caso, porém, o aumento para trincas observado foi de 2,36% enquanto para afundamentos foi de 2,87%, indicando que a sensibilidade do pavimento à variação deste parâmetro é baixa e similar para ambas as deteriorações analisadas.

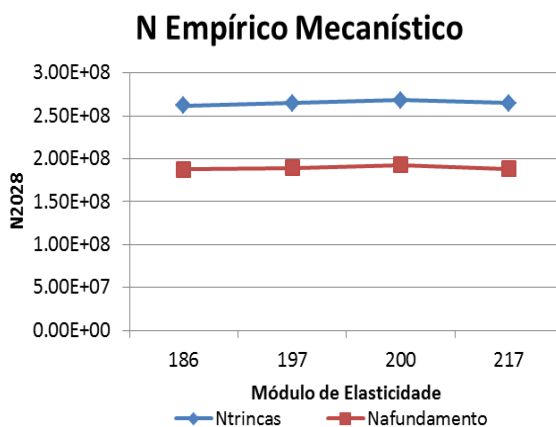


Figura 4 - Variação de N2028 conforme E da sub-base.

3.3 Variação do módulo do subleito

Quando variado o módulo de elasticidade do subleito, foram encontrados resultados diferentes aos obtidos com a variação do módulo nas outras camadas. Analisando-se os resultados para FV médio da frota, para valores referentes aos afundamentos, quando aumentado o módulo de elasticidade de 48 a 79 MPa ocorre queda com variação de 13,07% em relação ao valor inicial, enquanto que para trincas, conforme visto na Figura 5, os valores têm variação insignificante, com aumento de 0,13%.

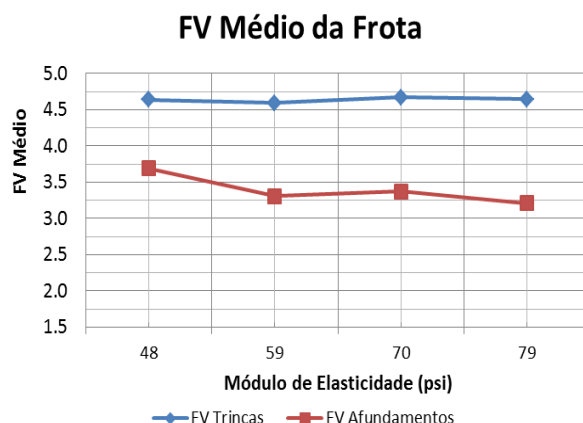


Figura 5 - Variação do FV médio da frota conforme E do subleito.

Com relação aos valores de N empírico-mecanístico, verificou-se que para trincas há aumento de 7,5% com o aumento do módulo de elasticidade de 48 a 70 MPa, e que com módulo de 79 MPa o valor de N2028 retorna à um valor bem próximo ao inicial em 48 MPa. Para afundamentos nas trilhas de rodas, conforme visto na Figura 6, há grandes variações, que chegam a queda de 15% entre 70 e 79 MPa.

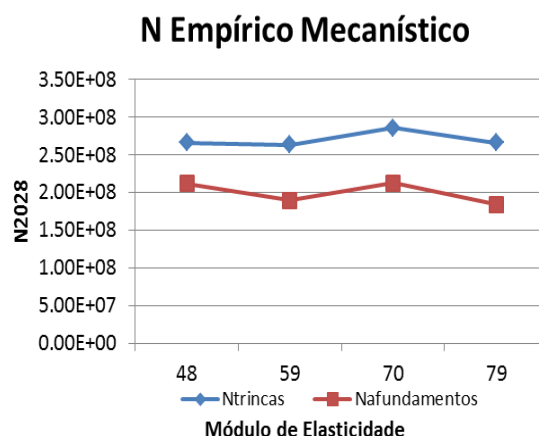


Figura 6 - Variação de N2028 conforme E do subleito.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que os pavimentos flexíveis apresentam certa sensibilidade à variação do módulo de elasticidade das camadas. Com isso, é possível analisar a influência da variação deste parâmetro no desempenho de pavimentos.

De acordo com os parâmetros considerados neste estudo, pode-se concluir que com a variação do E da base, a deformação responsável pelo surgimento das trincas por fadiga é mais sensível que aquela relacionada aos afundamentos nas trilhas de rodas, havendo aumento da deterioração com o aumento do E. Para a camada de sub-base, os valores de FV e N não têm relação linear com o aumento de E, havendo maior sensibilidade para o defeito de afundamentos nas trilhas de rodas. Já para o subleito, a sensibilidade à variação do E é muito baixa para defeitos de trincas, porém considerável para afundamentos.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Araucária (Protocolo n° 24685 - Chamada 14/2011) e ao CNPq que tem apoiado os esforços para o desenvolvimento desta pesquisa em diferentes formas e períodos.

REFERÊNCIAS

AASHTO. *AASHTO Guidelines for Pavement Management System* – American Association of State Highway and Transportation Officials – Washington DC/USA. 1990.

Carvalho, R. L.; Schwartz; C.W. Comparisons of flexible pavement designs: AASHTO empirical vs. NCHRP 1-37A mechanistic-empirical. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. TRB 2006 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C. 2006.

DNIT. Departamento Nacional De Infraestutura De Transporte. *Manual de Pavimentação*. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Cordenação Geral de Estudos de Pesquisa. 3.ed. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT. Departamento Nacional De Infraestutura De Transporte. *Quadro de Fabricantes de Veículos*. Brasília. 109p. 2007.

Fontenele, H.B. (2011) *Representação do Tráfego de Veículos Rodoviários de Carga através de Espectros de Carga por Eixo e seu Efeito no Desempenho dos Pavimentos*. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade Estadual de São Paulo. São Carlos.

Masad, S. *Sensitivity analysis of flexible pavement response and AASHTO 2002 design guide for properties of unbound layers*. Thesis (Master of Science). Texas A&M University, 2004.

NCHRP. National Cooperative Highway Research Program. *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. Final Report NCHRP 1-37 A. Champaign, Illinois. 2004.

Shahji, S. *Sensitivity analysis of AASHTO'S 2002 flexible and rigid pavement design methods*. Thesis (Master of Science). College of Engineering and Computer Sciencel of the University of Central Florida at Orlando. 2006.