Simpósio de Métodos Numéricos em Engenharia
25 a 27 de outubro, 2017

Análise dos efeitos dinâmicos em pavimentos flexíveis utilizando o métodos de elementos finitos

Figur, N.
Rezende, C. W. A.,
Márquez, M.,
Vicentini, D. F.
PPGECC
Universidade Federal do Paraná - UFPR
Curitiba, Brasil
neusafigur@gmail.com, marialemarquz@gmail.com,
cw.rezend@gmail.com, vicentini@ufpr.br

Cardoso, A.
PPGEC
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR
Curitiba, Brasil
alexandrecardosomj@gmail.com

***Resumo*—Diante da importância da malha rodoviária no país faz-se necessária a aplicação de métodos e tecnologias que abordem, com maior rigor, os esforços a que o pavimento está submetido. Durante a pesquisa foram verificados, com base em análise tridimensional de elementos finitos, o comportamento mecânico, as tensões e as deformações das fibras superiores da camada de concreto asfáltico de um pavimento flexível, sujeito à aplicação de esforços dinâmicos, considerando a carga gerada por um eixo padrão, com velocidades de 10, 40 e 80 Km/h. Como resultado, observou-se a redução das tensões e deformações na superfície do pavimento com o aumento da velocidade devido ao menor tempo de exposição no contato pneu/pavimento.**

Palavras-chave—pavimento flexível; elementos finitos; análise dinâmica; LSDYNA

I. INTRODUÇÃO

A ruptura estrutural ou funcional de pavimentos pode ser atingida devido a fatores relacionados ao clima, às técnicas construtivas e principalmente às solicitações impostas pelo tráfego. Deste modo torna-se inquestionável a influência da velocidade dos veículos nos danos causados em pavimentos, uma vez que, a cada passagem de um eixo, o pavimento perde uma parcela da vida de serviço segundo critérios de ruptura pré-estabelecidos. Dada parcela pode ser denominada como dano unitário do pneu sobe o pavimento [1].

Neste contexto, os componentes envolvidos na interação veículo-pavimento relacionam-se da seguinte forma: o veículo se movimenta sobre a superfície irregular do pavimento transferindo-lhe cargas dinâmicas através dos pneus. A rugosidade da superfície do pavimento, por sua vez, transmite forças dinâmicas ao veículo que alteram a força do pneu transmitida ao pavimento. Essas forças por outro lado, alteram as respostas primárias do pavimento determinado a quantidade de danos causados pelo veiculo no pavimento [2].

Assim, com base no disposto, o objetivo desta pesquisa é analisar a influência da variação da velocidade dos veículos no comportamento estrutural de um pavimento flexível por meio de análise das tensões e deformações nas faces superior e inferior da camada de concreto asfáltico.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O pavimento é uma estrutura complexa [1], onde diversos mecanismos podem afetar seu comportamento, tais como a fadiga, o envelhecimento dos materiais, a umidade, efeitos dinâmicos, entre outros fatores. Os primeiros estudos dinâmicos em pavimentos datam de 1950 [3], onde se

verificou a distribuição das tensões ao longo das camadas do pavimento quando um pulso de carga em movimento é aplicado sobre sua superfície.

A partir de então, verificou-se que a previsão das cargas dinâmicas atuantes sobre pavimentos asfálticos é de grande relevância para o bom desempenho de sua estrutura durante sua vida útil, a qual tem sido minorada devido à evolução de alguns parâmetros do tráfego como altas velocidades, grandes volumes de tráfego e cargas pesadas. Tais ponderações permitem a avaliação do dano acumulado no interior do pavimento proveniente dos esforços gerados pela incidência do tráfego devido à interação veículo-pavimento [4] – [5].

Em condições normais de serviço a camada de revestimento em pavimentos asfálticos é solicitada a esforços de tração e compressão devido à flexão, ou seja, o estado de tensões na face superior e inferior da camada asfáltica altera de compressão para tração à medida que retorna ao seu estado original após a passagem do pneu, como ilustrado na Fig. 1. As posições A e B do pneu representam o carregamento cíclico que resulta em deformações de compressão (ε_c) e tração (ε_t) na camada de revestimento e tensões de compressão (σ_z) e deformações (ε_z) na camada de subleito [6]-[7].

As demais camadas do pavimento por sua vez, como citado por [6], são submetidas principalmente a esforços de compressão, exceto em alguns casos onde a camada sob o revestimento é composta por material estabilizado quimicamente de maneira a torná-lo resistente a esforços de tração.

Neste contexto em função da análise dinâmica, alguns pesquisadores defendem que as cargas estáticas são mais prejudiciais para os pavimentos do que cargas dinâmicas, ou seja, quanto menor a velocidade do veículo maior o dano sobre o pavimento visto que os efeitos dinâmicos provocados pelo veículo contribuem para aliviar as deformações existentes [1].

Conclusões semelhantes foram obtidas por [8] os quais verificaram que o aumento da duração da carga intensifica o deslocamento e a tensão vertical, sendo esta, a razão para a grande ocorrência de rupturas apresentadas em pavimentos em áreas urbanas sujeitos às baixas velocidades dos veículos.

Beskou et al. [9] estudaram pavimentos considerando o comportamento elástico e viscoelástico em condições de cargas estáticas e dinâmicas. Os referidos autores obtiveram deflexões maiores no caso dinâmico do que no caso estático, para o modelo elástico. No entanto, para o modelo viscoelástico as deflexões foram predominantes no caso estático.

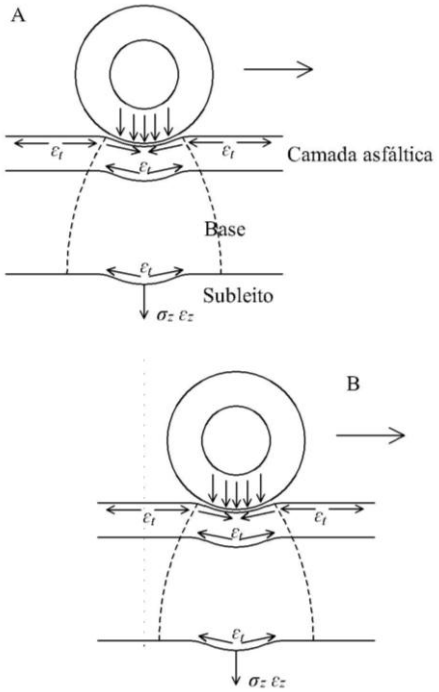

Fig. 1. Respostas do pavimento flexível sob a ação de cargas dinâmicas. Adaptado [6].

III. CONFIGURAÇÃO DO MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

O estudo dos efeitos dinâmicos em pavimentos flexíveis desenvolvidos neste trabalho foi feito por meio de análise numérica com emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF).

Para a modelagem do problema em questão, foi utilizado o programa ANSYS, por meio de uma análise dinâmica explicita tridimensional. O programa consiste em uma potente ferramenta, fornecendo uma interface ao LS-DYNA, usada para calcular soluções rápidas para cargas dinâmicas, grandes deformações e complexos problemas de contato.

A. Geometria e propriedades do Modelo de pavimento

A seção do pavimento analisado é composta por três camadas: revestimento em concreto asfáltico e uma base de solo granular assentes sobre o solo do subleito natural compactado. Os valores de Módulo de Elasticidade (E), Coeficiente de Poisson (ν), massa específica (ρ) dos materiais e espessura das camadas (H) utilizados na simulação numérica são apresentados na Tabela I retirados de [10]. Para estes materiais foi considerado o comportamento elástico linear.

TABELA I. PROPRIEDADES DO PAVIMENTO [10]

Material	**E (MPa)**	**ν**	**ρ(Kg/m³)**	**H (mm)**
Revestimento	3000	0,30	23	100
Base	300	0,35	20	300
Subleito	60	0,40	20	600

B. Condições de contorno e carregamento

Os elementos que compõem a geometria do pavimento possuem restrições verticais e horizontais para o deslocamento, conforme Fig. 2, onde as condições de contorno são aplicadas e a divisão das camadas que compõem o pavimento estão representadas.

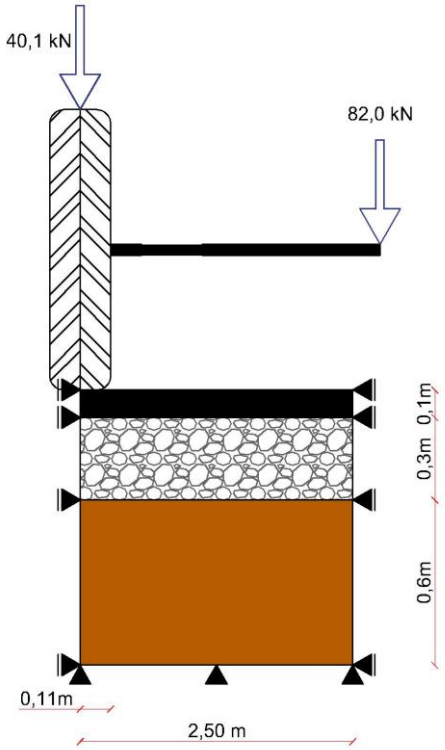

Fig. 2. Descrição da geometria e condições de contorno do problema

As condições de contorno aplicadas simulam a situação de um eixo padrão normatizado, ou seja, eixo simples de rodagem dupla, com carga de 8,2 t (82 kN), de acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT [11]. Por simplicidade, foi modelada apenas uma das rodas do eixo traseiro de um quarto de caminhão (a roda esquerda, segundo a Fig. 2), onde o eixo de simetria do problema coincide com o centro da roda.

O pneu foi modelado com o elemento finito do tipo SHELL163 (elemento de quatro nós, com doze graus de liberdade em cada nó: deslocamentos, velocidades, acelerações e rotações em x, y e z). O sistema cartesiano de coordenadas está localizado no eixo do pneu, este é do tipo radial e modelo 9,00x20, com dimensões 9" (22,4 cm) de largura nominal da seção transversal e 20" (50,8 cm) de diâmetro nominal do aro. A pressão de inflação do pneu foi de 0,74 MPa. O emprego de tais dados justifica-se pela pesquisa realizada por [12] que identificou a predominância do modelo na rodovia BR 277, trecho Curitiba Paranaguá/PR.

Em termos de área de contato pneu-pavimento, esta foi assumida como sendo uniforme, cujo tamanho depende da pressão de contato. Na análise de tensões e deformações, assumiu-se como indicado por [13] e definido em (1):

$$A = p / \sigma \quad (1)$$

Onde p é a carga da roda e σ a pressão de inflação do pneu.

Na análise numérica em questão, empregou-se a forma aproximada da área de contato do pneu como a apresentada na Fig. 3, a qual é composta por um retângulo e dois semicírculos.

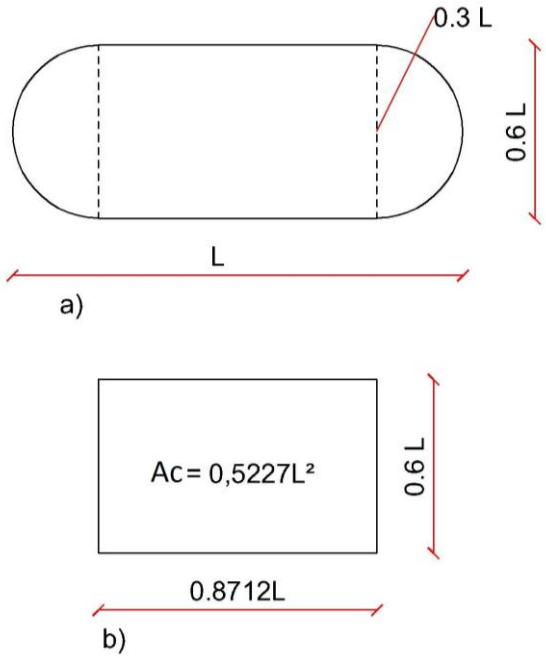

Fig. 4. (a) área de contato entre a superfície do pavimento e o pneu (b) área equivalente de contato [13].

Ao assumir o comprimento L e a largura 0,6L, a área de contato é definida conforme (2):

$$Ac = \pi (0,3L)^2 + (0,4L)(0,6L) = 0,5227L^2 \quad (2)$$

Onde Ac é a área de contato pneu-pavimento.

Deste modo, considerando a pressão de enchimento do pneu igual a 0,740 MPa e a força de 41,0 kN a carga da roda, determina-se L = 325,5 mm (A_c = 41,0 kN/0,740 MPa = 5405,405 mm² e L = $\sqrt{A_c}$/0,5227).

Em relação ao tipo de contato, a interação entre pneu e o pavimento foi considerada do tipo superfície vs. superfície, e a opção de contato automático, conforme disponibilizado na biblioteca do ANSYS/LS-DYNA. O coeficiente para o atrito entre o pneu e o pavimento foi de 0,8, conforme [14], simulando a condição para pavimentos asfálticos secos.

C. Discretização do domínio

A concepção da malha do pavimento, foi realizada através de um elemento finito quadrático de oito nós (SOLID 164), com três graus de liberdade cada (para deslocamentos, velocidades e acelerações nodais nas direções x, y e z). A Fig. 3 apresenta a discretização do domínio e as dimensões de cada camada do pavimento, o

ponto de aplicação da carga e os nós onde se realizam as análises do estado e tensão e deformação.

A espessura do subleito é infinita, no entanto, para a análise em MEF usualmente é necessário fixar um domínio finito. Assim adotou-se uma espessura e 0,60 m para o subleito, totalizando uma espessura de 1,00 m a qual foi suficiente para caracterizar o contorno.

O problema foi descrito a partir dos dados apresentados anteriormente, dos valores de pressão atuante sobre o eixo de roda dupla, e em seguida foram realizadas as simulações considerando velocidades de 10 Km/h, 40 Km/h e 80 Km/h, cujos efeitos de tensões e deformações foram avaliados nas fibras superiores da camada de revestimento a partir do eixo de simetria do problema, considerando-se as direções longitudinal (direção de rodagem) e transversal.

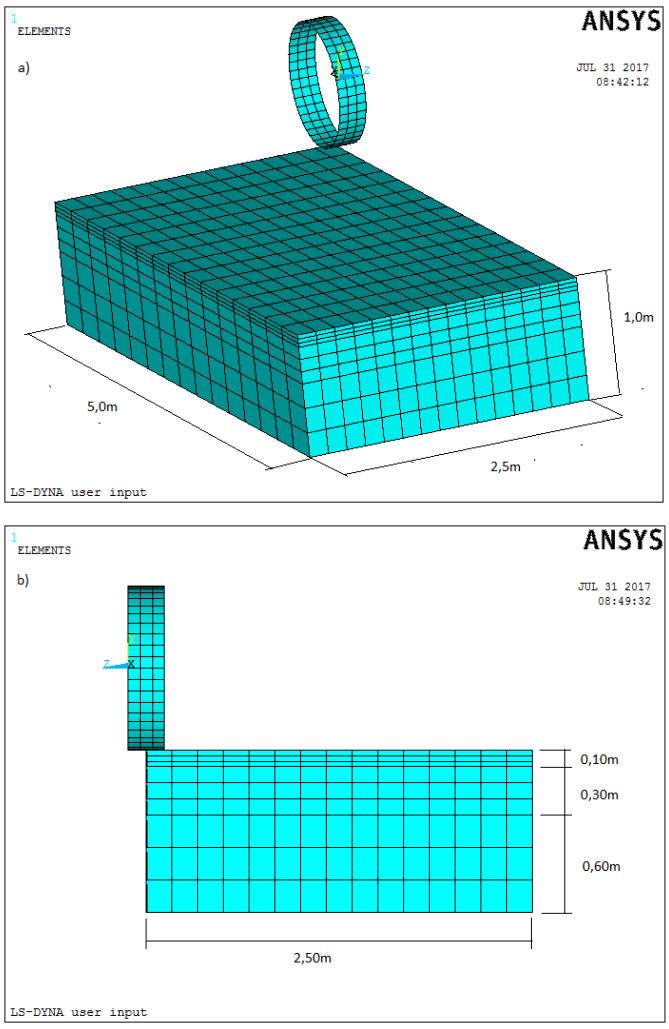

Fig. 3. Discretização (malha) do domínio por meio do MEF.

IV. RESULTDOS E DISCUSSÕES

A análise das tensões e deformações foi realizada considerando t = 1,0s, t = 0,25s e t = 0,125s para as velocidades 10, 40 e 80 Km/h, respectivamente.

Para efeito de comparação na análise dos valores encontrados, as Fig. 4 e 5 mostram as amplitudes das tensões, longitudinal e transversal respectivamente, para as velocidades consideradas.

Observa-se que as tensões ao longo das direções longitudinais e transversal são mais acentuadas para velocidades menores, ou seja, quanto maior a velocidade, menor é a tensão ao longo do pavimento.

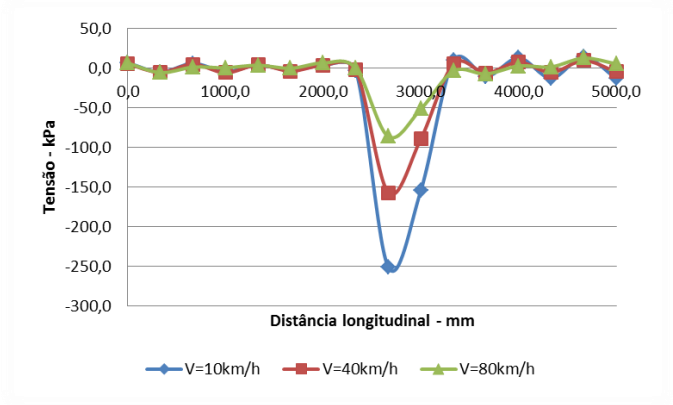

Fig. 4. Tensões na superfície do revestimento medidas ao longo da direção longitudinal (direção de rodagem).

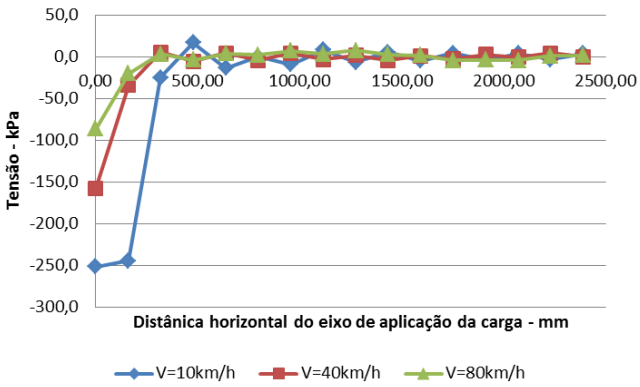

Fig. 5. Tensão na superfície do pavimento ao longo da direção transversal.

Em temos das deformações na superfície do pavimento, as Fig. 6 e 7 apresentam as amplitudes das deformações para as mesmas considerações de velocidade.

Observa-se que as deformações ao longo das direções longitudinal e transversal são maiores para velocidades menores, proporcionalmente à redução da tensão. Ou seja, quanto maior a velocidade, menor o tempo de contato do pneu com o pavimento, menor a tensão e consequentemente menor a deformação.

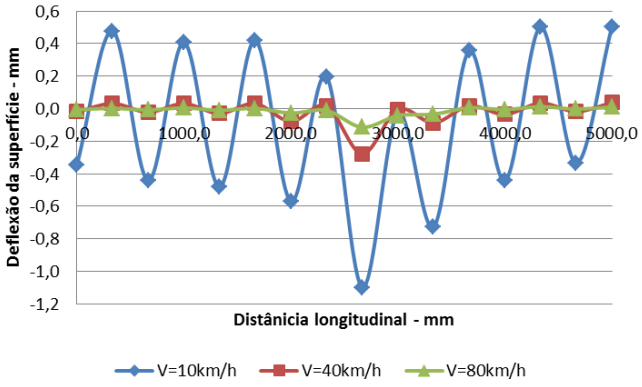

Fig. 6. Deflexão (deslocamento vertical) na superfície do pavimento ao longo da direção longitudinal (direção de rodagem).

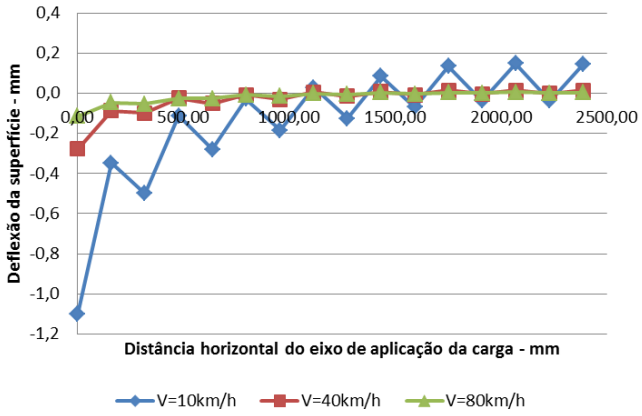

Fig. 7. Deflexão (deslocamento vertical) na superfície do pavimento ao longo da direção transversal.

A variação percentual das tensões e deformações no eixo de aplicação da carga de acordo com a velocidade do pneu são representadas nas Fig. 8 e 9.

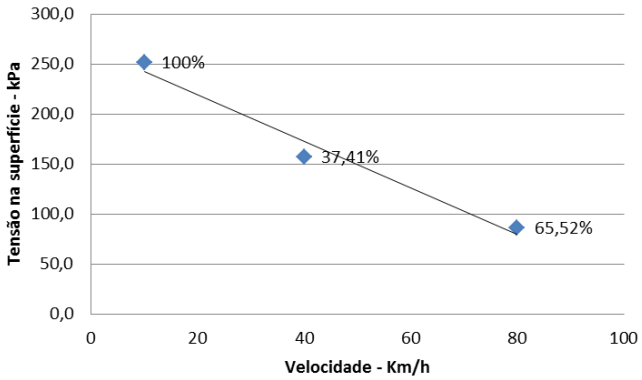

Fig. 8. Tensão no eixo de aplicação das cargas para variação da velocidade.

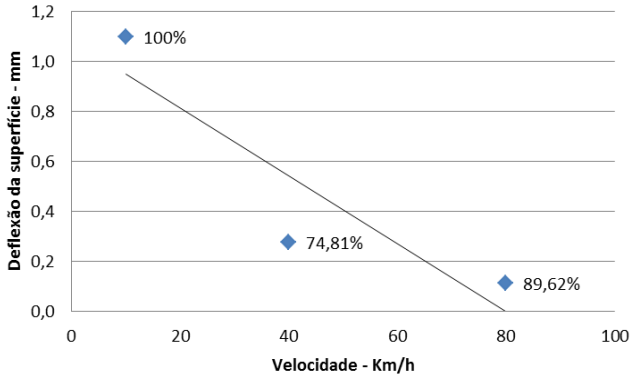

Fig. 9. Deflexão no eixo de aplicação das cargas para variação da velocidade.

Percebe-se uma redução de 37,41% da tensão quando do aumento da velocidade, de 10 para 40 Km/h e de 65,52% no aumento de 10 para 80 Km/h. A variação das tensões, quando da variação da velocidade de 40 para 80 Km/h foi de 55,10%. Já em relação à deformação, verifica-se uma redução de 74,81% quando do aumento da velocidade, de 10 para 40 Km/h e de 89,62% no aumento de 10 para 80 Km/h. A variação da tensão, quando da variação da velocidade de 40 para 80 Km/h foi de 41,20%.

V. CONCLUSÕES

Foram realizadas simulações computacionais baseadas em um modelo tridimensional elástico-linear para estudar o comportamento das tensões e deformações na fibra superior de um pavimento asfáltico sujeito à aplicação de cargas dinâmicas.

Obtém-se um modelo simplificado, sendo indicada em trabalhos futuros, para uma resposta mais generalizada e abrangente, a necessidade de maior refinamento da malha e a consideração das diferentes leis de comportamento dos materiais em questão.

No entanto, com base neste estudo, foi possível observar que a velocidade da carga em movimento tem um efeito significativo sobre a resposta (em termos de tensões ou deflexões) do pavimento asfáltico, sendo benéfica em comparação às velocidades mais baixas, concordando com os resultados das pesquisas de [1] e [8]. No estudo em questão, essa diferença foi de 65,52%, em termos de tensões e 89,62%, em deslocamentos ao longo da direção de rodagem, para os casos mais severos.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos aos programas PPECC da Universidade Federal do Paraná – UFPR, e ao PPGEC da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, bem como, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e ao suporte financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES concedido ao aluno Alexandre Cardoso.

REFERÊNCIAS

[1] ZHI, S., GUN, W. W., HUI, L. X., BO, T., Evaluation of fatigue crack behavior in asphalt concrete pavements with different polymer modifiers. Construction and Building Materials, v. 27, n. 1, pp. 117–125, 2012.

[2] KHAVASSEFAT, P., JELAGIN, D., BIRGISSON, B. Dynamic response of flexible pavements at vehicle-road interaction. Road Materials and Pavement Design, v. 16, n. 2 pp. 256-276, 2015.

[3] SNEDDON, I. N., Stress produced by a pulse of pressure moving along the surface of a semi-infinite solid. Rendiconti Circolo Matematico di Palermo 1952. pp. 57-62.

[4] NAVARRINA, F., RAMÍREZ, L., PARÍS, J., NOGUEIRA, X., COLOMINAS, I., CASTELEIRO, M., MESA, J. R. F. DE., Comprehensive Model for Fatigue Analysis of Flexible Pavements Considering Effects of Dynamic Axle Loads. Journal of the Tranportation Research Board, No. 2524, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2015, pp. 110-118.

[5] SHI & CAI. Simulation of Dynamic Effects of Vehicles on Pavement Using a 3D Interaction Model. Journal of Transportation Engineering, Vol. 135, No 10, October 1, 2009.

[6] MAHONY, M. J. O., UEBERSCHAER, A., OWENDE, P. M. O., WARD, S.M., Bearing capacity of forest access roads built on peat soils. Journal of Terramechanisc, v. 37, pp. 127-138, 2000.

[7] BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G. DA., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B., Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 3a reimpre ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.

[8] JUNIOR, F. E., JUNIOR, E. P., HOLANDA, Á. S. DE., ARAÚJO, T. D. P., SOARES, J. B. Dynamic analysis of asphaltic pavements. Departament of Transportation Engineering and Departament of Structural Engineering, Federal University of Ceará, Fortaleza – CE – Brazil. 2006

[9] BESKOU, N., HATZIGEORGIOU, G. D., THEODORAKOPOULOS, D. D., Dynamic inelastic analysis of 3D flexible pavements under moving vehicles: A unified FEM treatment. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, v. 90, p. 420–431, 2016.

[10] SANTOS, M. A. A. Simulação numérica dos efeitos de cargas dinâmicas na vida de fadiga de pavimentos. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

[11] BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de Pavimentação. 3.ed. – Rio de Janeiro, 2016. 274p.

[12] PEREIRA, A. M. Análise crítica dos fatores de equivalência adotados pelo DNER e sua adequação as rodovias de tráfego pesado. Tese (Professor titular) – Departamento Transportes, Universidade Federal do Parana, 330p., 1985.

[13] HUANG, Y. H. Pavement Analysi s and Desig n. 2nd. ed.,1993.

[14] ARAGÃO, R. F. Acidentes de Trânsito Análise da Prova Pericial. 6a Edição ed. Campinas, SP: 2016.