

IAG423-03-2013
O EFEITO DOS DANOS CAUSADOS À SUPERFÍCIE E NO INTERIOR
DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS SOB APLICAÇÃO DE
CARREGAMENTO PESADO
EL EFECTO DE DAÑOS CAUSADOS EN LA SUPERFICIE DE
PAVIMENTOS FLEXIBLES DEBIDO A LA APLICACIÓN DE CARGAS
PESADAS

Aline Colares do Vale
Universidade do Minho
Guimarães, Portugal
alinecdovale@gmail.com

Jorge Carvalho Pais
Universidade do Minho
Guimarães, Portugal
jpais@uminho.pt

Resumo

Nas últimas décadas novas tecnologias têm sido inseridas nas indústrias de pneus de caminhões desenvolvendo materiais mais resistentes e apropriados para o tipo de carregamento. Apesar do aprimoramento destas técnicas, os veículos pesados ainda representam o principal agente de degradação de pavimentos flexíveis nos países em desenvolvimento. Esta pesquisa tem como objetivo avaliar os danos próximos à superfície do pavimento causados por dois tipos de pneus (o pneu duplo 285/80R22,5 e o extra-largo 385/65R22,5), bem como o comportamento de tensões e extensões no interior do pavimento, considerando dois níveis de carregamento por eixo (80kN e 130kN). Para a análise será modelado um pavimento flexível em três dimensões utilizando a técnica de elementos finitos. Conclui-se que é possível optar por uma configuração geométrica de pneus duplos ou pneus extra-largo no veículo pesado. Entretanto, os pneus duplos apresentam menores efeitos danosos no interior do pavimento quando comparados aos pneus extra-largos. Verifica-se, ainda, que o aumento do carregamento por eixo aumenta consideravelmente as tensões de contato do pneu sob o pavimento e correspondentemente as extensões de cisalhamento próximas à superfície do pavimento.

Resumen

En las últimas décadas se han introducido nuevas tecnologías en la industria de los neumáticos de camiones, desarrollando materiales más resistentes y adecuados para el tipo de carga de éstos. A pesar de la mejora de éstas técnicas, los vehículos pesados todavía representan el principal agente de la degradación de los pavimentos flexibles en los países en desarrollo. Esta investigación tiene como objetivo evaluar los daños próximos a la superficie del pavimento causada por dos tipos de neumáticos (doble 285/80R22 y extra ancho 385/65R22,5), así como el comportamiento de las tensiones y extensiones en el interior del pavimento, considerando dos niveles de carga por eje (80KN y 130 KN). Para el análisis se modelará un pavimento flexible en tres dimensiones utilizando la metodología de elementos

finitos. Se concluye que es posible optar por una configuración geométrica de los neumáticos dobles o neumáticos extra anchos en vehículos pesados. A su vez, los neumáticos dobles tienen menores efectos dañinos en el interior del pavimento cuando son comparados con los neumáticos extra anchos. Se verifica también que el aumento de carga por eje aumenta considerablemente las tensiones de contacto del neumático sobre el pavimento y correspondientemente las extensiones de cizallamiento cercanas a la superficie del pavimento.

INTRODUÇÃO

Os pavimentos flexíveis têm sido dimensionados para suportar o tráfego de projeto, sendo composto por diferentes tipos de veículos, os quais apresentam diferentes tipos de eixos e rodas e pressão de enchimento dos pneus. Entretanto, os veículos pesados são os principais agentes responsáveis pela degradação dos pavimentos flexíveis provocando principalmente fendilhamento por fadiga e deformações permanentes. Além disso, as degradações são ainda função das características dos pavimentos, condições operacionais e fatores ambientais.

A otimização da compatibilidade dos veículos pesados para se adequarem ao sistema viário é um problema muito complexo. Porém, há um entendimento mecanístico das formas como os veículos pesados interagem com os pavimentos provocando-lhes danos. A interação dos veículos pesados sobre os pavimentos dá-se através da área de contato pneu-pavimento por onde são transmitidas as cargas dos veículos ao pavimento podendo ser por meio de pneu simples, duplos ou extra-largos.

O mercado de veículos pesados tem assistido a um aumento das configurações dos veículos quanto a novas configurações dos eixos e suspensões, novos tipos de pneus, e maior pressão de enchimento alterando a pressão de contato entre o pneu e o pavimento, influenciando significativamente o estado de tensão/extensão instalado no pavimento, o qual conduz a maiores degradações no pavimento. Devido a este fato diversos estudos teóricos e experimentais foram desenvolvidos nos últimos anos com intuito de verificar os danos causados por veículos pesados nas estruturas dos pavimentos.

Diante do exposto, esta investigação tem como objetivo analisar o efeito dos danos causados próximos à superfície dos pavimentos flexíveis considerando diferentes níveis de carregamento na interface pneu-pavimento, bem como o comportamento do estado tensão/extensão instalado no interior do pavimento.

Assim, neste trabalho foi utilizado o programa de elementos finitos DIANA® para desenvolver um modelo de pavimento em três dimensões, considerando o comportamento visco-elástico linear dos materiais das camadas betuminosas e elástico linear para as demais camadas. Foram modelados dois tipos de pneus: um pneu duplo do tipo 285/80R22,5 e um extra-largo do tipo 385/65R22,5. Para estas configurações de pneus foram consideradas diferentes níveis de carregamento por eixo na interface pneu/pavimento (80kN e 130kN).

Os resultados obtidos permitiram observar o estado de tensão e extensão instalado no interior do pavimento quando submetido à diferentes níveis de carregamento na interface pneu-pavimento e, também, os efeitos causados próximos à superfície do pavimento que poderão ser responsáveis pelo fendilhamento com origem à superfície.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A interação dos veículos pesados sobre os pavimentos tem sido alvo de inúmeras investigações (Myers et al., 2001; Al-Qadi et al., 2002; De Beer et al., 2005; Douglas et al., 2008). Tais estudos forneceram investigações abrangentes no que diz respeito a distribuição do carregamento dos pneus dos veículos pesados sobre o pavimento, tendo sido observado o estado de tensão e extensão instalado em uma estrutura de pavimento flexível.

Os pesquisadores De Beer et al. (2004) realizaram uma investigação em que quantificaram as cargas dos veículos pesados sobre um pavimento flexível. Nesta pesquisa, foi utilizado um conjunto de sensores capaz de medir a pressão de contato e a força aplicada pelos veículos pesados no pavimento. Esse sistema de sensores (Stress-In-Motion) foi originalmente desenvolvido para a obtenção dos valores em três dimensões das pressões de contato devido à interação pneu-pavimento.

A abordagem proposta por Xia (2010) envolveu uma simulação em elementos finitos da interação pneu-pavimento sobre uma estrutura de pavimento flexível. Nesta pesquisa foi modelado um pavimento com comportamento elástico e, também, dois eixos de um veículo pesado, e teve como objetivo mostrar uma melhor definição da interação pneu-pavimento utilizando a técnica de elementos finitos.

Sharkawy et al. (2011) investigaram e analisaram o efeito das sobrecargas de veículos pesados no pavimento e desenvolveram métodos de regulamentação para determinados veículos pesados de acordo com os danos que causam ao pavimento. Al-Qadi et al. (2005) desenvolveu uma simulação em elementos finitos da área de contato pneu-pavimento com o objetivo de analisar o nível de carregamento e da pressão de contato pneu-pavimento considerando a presença de sulcos existentes nos pneus. Foram analisados duas configurações de pneus (pneus duplos e extra-largos) e os resultados mostraram que os pneus extra-largos apresentaram maiores danos ao pavimento quando comparados aos pneus duplos.

Os investigadores Wang et al. (2011) avaliaram o impacto de pneus extra-largos sobre um pavimento flexível. Neste estudo foi modelado um pavimento em três dimensões com propriedade visco-elástica linear, onde foi inserido um carregamento de veículos pesados com pneus extra-largos. Concluíram que os veículos pesados com pneus extra-largos apresentaram maiores danos por fadiga e deformação permanente quando comparados aos veículos pesados com pneus duplos.

METODOLOGIA

As camadas betuminosas são concebidas para suportar as cargas provenientes do tráfego, além de garantir conforto e segurança aos utentes do sistema rodoviário. Entretanto, nas últimas décadas a estrutura dos pavimentos flexíveis tem tido seu comportamento comprometido devido ao aumento do fluxo de veículos e ao excesso de cargas transportadas, causando deterioração prematura e, em consequência, elevando os custos operacionais e de reabilitação da rede rodoviária.

Diante desta prerrogativa, faz-se necessário o desenvolvimento dum modelo de pavimento que possa permitir a análise do comportamento tensão/extensão inserido neste quando submetido a carregamentos veiculares pesados.

Modelação do pavimento

A pesquisa tem como intuito analisar o comportamento de um pavimento flexível quando submetido ao carregamento de veículos pesados para diferentes condições de carregamento. Para tal, foi adotado um modelo de elementos finitos tridimensional com elementos cúbicos de 8 nós. As dimensões do pavimento adotado foram $2\text{m} \times 2\text{m}$. Esta dimensão foi selecionada com intuito de reduzir os efeitos de borda, tendo sido modeladas duas camadas betuminosas, uma camada granular e o solo de fundação (Figura 1).

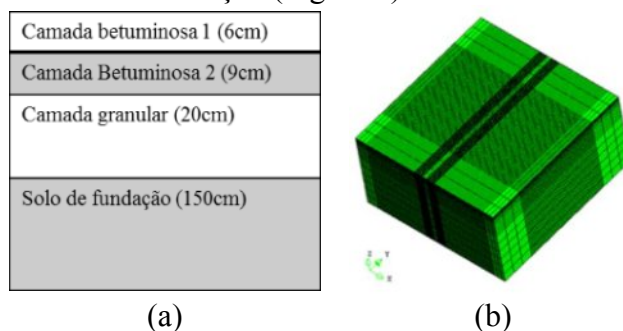


Figura 1. (a) Representação esquemática do pavimento e (b) modelo em 3D do pavimento

Para a camada granular e de solo de fundação foram consideradas propriedades isotrópicas elásticas que são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades isotrópicas elásticas

Camada	Módulo Elástico (MPa)	Coefficiente de Poisson	Espessura (cm)
Granular	400	0,40	20
Solo de fundação	100	0,35	150

Foram consideradas duas camadas betuminosas de comportamento distintos e com diferentes espessuras, sendo a primeira apresentando 6cm e a segunda apresentando 9 cm. Ambas as camadas assumiram propriedades visco-elásticas obtidas através do ensaio laboratorial de fluência em cinco diferentes níveis de temperaturas (-10°C , 0°C , 10°C , 20°C e 30°C), apresentadas na Tabela 2. Posteriormente, utilizou-se o Modelo de Kelvin Generalizado para descrever o comportamento visco-elástico isotrópico de uma mistura betuminosa usinada à quente, cuja equação resultante de deformações do modelo também é denominado de Séries de Prony. Esta série é expressa pela Equação 1.

$$D(t - \tau) = D_0 + \sum_{i=1}^n D_i \left(1 - e^{-\frac{t-\tau}{\tau_i}}\right) \quad (1)$$

em que

D_0 : função fluência inicial ou vítrea;

D_i : função fluência de cada parcela visco-elástica da curva de fluência;

τ_i : tempo de relaxação de cada parcela da curva de fluência;

n : número de parcelas visco-elásticas consideradas na curva de fluência.

Tabela 2. Propriedades visco-elásticas isotrópica das camadas betuminosas

i	Camada betuminosa 1	Camada betuminosa 2	τ_i
∞	$1,54 \cdot 10^4$	$2,08 \cdot 10^4$	-
1	$2,03 \cdot 10^4$	$4,42 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^{-4}$
2	$1,88 \cdot 10^4$	$4,38 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^{-3}$
3	$5,98 \cdot 10^3$	$1,25 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^{-2}$
4	$4,77 \cdot 10^3$	$1,74 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^{-1}$
5	$1,13 \cdot 10^3$	$2,51 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^0$
6	$8,15 \cdot 10^2$	$4,35 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^1$
7	$1,53 \cdot 10^2$	$3,71 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2$
8	$1,06 \cdot 10^2$	$7,86 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^3$
9	$7,30 \cdot 10^0$	$1,98 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^4$

Modelação do carregamento

Ao considerar os modelos de carregamento deve-se distinguir a área de contato pneu-pavimento, a magnitude de carregamento e sua distribuição. Seguindo estas prerrogativas, este trabalho simulou um modelo de distribuição do carregamento cuja intensidade de pressão de enchimento foi de 720kPa, distribuída de forma não-uniforme na área de contato pneu-pavimento, considerando duas intensidades de magnitude de carregamento por eixo, nos valores de 80kN e 130kN. A Figura 2 ilustra o modelo de carregamento.

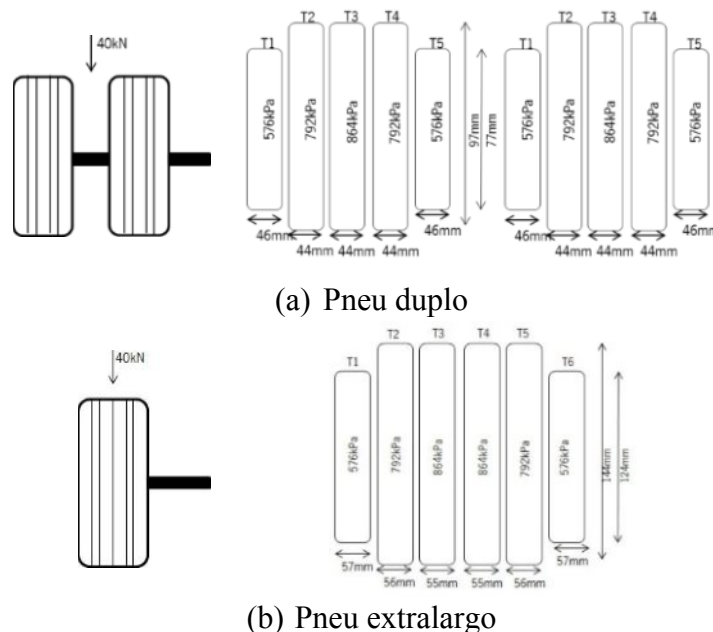


Figura 2. Representação esquemática do carregamento e da área de contato de pneus considerando pressão nominal de enchimento de 720kPa: (a) pneus duplos do tipo 285/80R22,5; (b) pneu extra-largo do tipo 385/65R22,5

Para simular o comportamento do modelo em estudo e os seus efeitos combinados sobre a estrutura de um pavimento foi modelada uma área de contacto pneu/pavimento de forma a aproximar da área real de contacto do pneu no pavimento.

Caso de estudo

Nesta pesquisa foi desenvolvido um modelo tridimensional de elementos finitos utilizando o programa comercial DIANA® onde foi analisada a aplicação de um carregamento quasi-estático para uma configuração de pneu duplo e outra de pneu extra-largo.

No modelo tridimensional do pavimento foram investigados os seguintes parâmetros:

- Tensão vertical instalada no pavimento;
- Extensão de cisalhamento instalada na lateral dos pneus;
- Extensão longitudinal no sentido do movimento do carregamento;
- Extensão horizontal no fundo da última camada betuminosa;
- Extensão vertical no topo do solo de fundação.

RESULTADOS E ANÁLISES

A modelação do comportamento do pavimento perante as condições de carregamento definidas acima permitiu obter resultados que foram analisados considerando o plano vertical transversal à estrada que passa pelo eixo de simetria dos pneus.

Na Figura 3 é apresentada as tensões verticais instaladas no interior do pavimento para os dois tipos de pneus em estudo (285/80R22,5 e 385/65R22,5), considerando os seguintes carregamentos por eixo: 80kN e 130kN. Tendo como referência o ponto de simetria do carregamento para cada configuração de pneu.

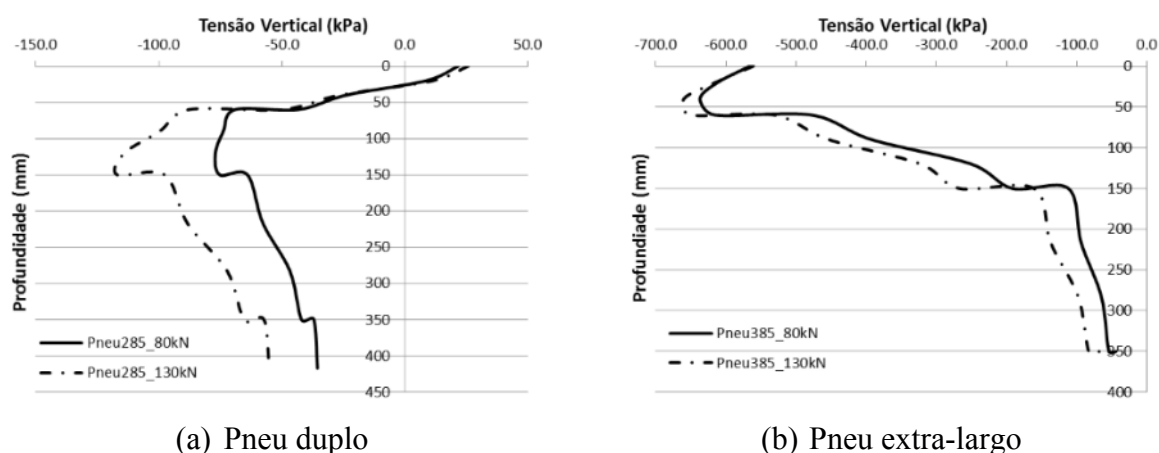


Figura 3. Tensão vertical ao longo da profundidade do pavimento para os dois níveis de carregamento: (a) pneus duplos do tipo 285/80R22,5; (b) pneu extra-largo do tipo 385/65R22,5

Observa-se, na Figura 3, que o comportamento apresentado das tensões verticais ao longo do plano vertical é distinto para os dois tipos de pneus, entretanto o pneu duplo apresentou menores tensões verticais próximo à superfície quando comparados aos valores do pneu extra-largo. Deve-se, provavelmente, a forma de distribuição do carregamento na área de contato pneu-pavimento.

Na Figura 3, o pneu extra-largo apresentou uma diminuição bastante considerável das tensões verticais ao longo da profundidade do pavimento e à 150mm de profundidade seus valores aproximaram-se dos valores do pneu duplo. Verifica-se, ainda, que o aumento das tensões verticais são diretamente proporcionais ao aumento do carregamento por eixo.

Quanto à extensão de cisalhamento, a qual associada à componente de tensão vertical, poderá ser responsável pelo aparecimento de fendilhamento próximo à superfície do pavimento. A Figura 4 ilustra esquematicamente a distribuição da extensão de cisalhamento instalada na borda do pneu no interior da camada betuminosa sob a influência da configuração de um pneu duplo e um extra-largo, tendo em vista os diferentes níveis de carregamento (80kN e 130kN).

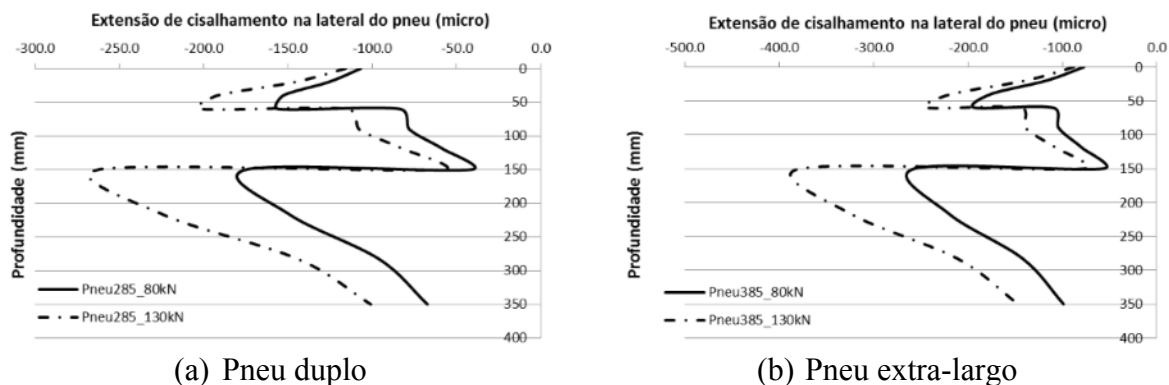


Figura 4. Extensão de cisalhamento instalada na borda dos pneus para os dois níveis de carregamento: (a) pneus duplos do tipo 285/80R22,5; (b) pneu extra-largo do tipo 385/65R22,5

Na Figura 4, observa-se que o comportamento da extensão de cisalhamento no interior da camada betuminosa é semelhante para os dois tipos de pneus em estudo. Verifica-se que na superfície da camada betuminosa, ambos os pneus em estudo apresentaram valores aproximados de extensão de cisalhamento, independente do nível de carregamento por eixo. Entretanto, à 50mm de profundidade da camada betuminosa, os valores de extensão de cisalhamento foram consideravelmente maiores para ambos os pneus quando comparados aos valores da superfície.

Verifica-se, na Figura 4, que a influência do pneu extra-largo induz valores superiores de extensões de cisalhamento quando comparados aos valores do pneu duplo. Observa-se, ainda, que o aumento do carregamento por eixo propicia um aumento considerável da extensão de cisalhamento no interior do pavimento, sendo um provável responsável pelo aparecimento de fendilhamento próximo à superfície do pavimento.

A Figura 5 ilustra a extensão longitudinal ao longo do movimento do carregamento para os dois tipos de pneus em estudo (285/80R22,5 e 385/65R22,5), considerando os seguintes carregamentos por eixo: 80kN e 130kN.

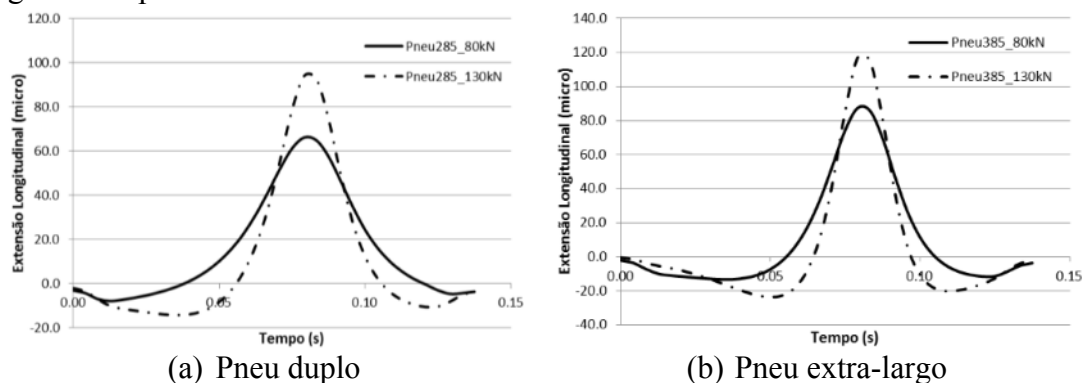
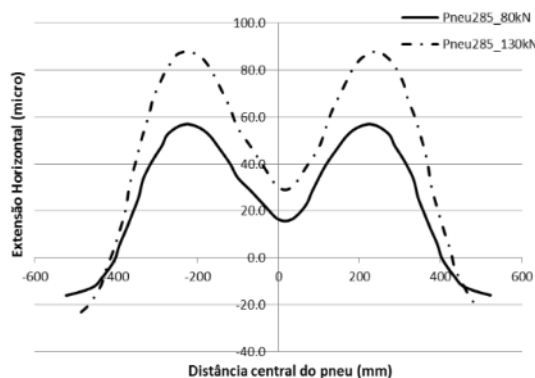


Figura 5. Extensão longitudinal instalada no pavimento ao longo do movimento do carregamento: (a) pneus duplos do tipo 285/80R22,5; (b) pneu extra-largo do tipo 385/65R22,5

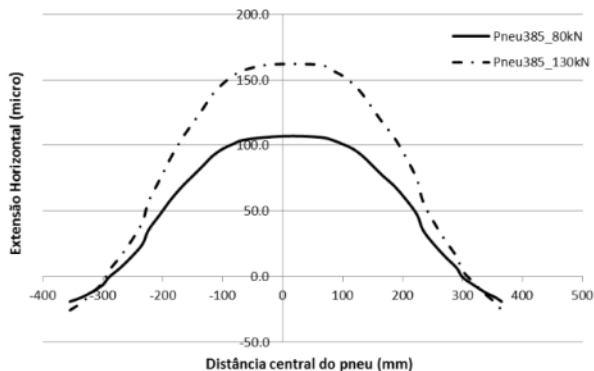
Na Figura 5 observa-se que para os dois tipos de pneu, independente do valor do carregamento por eixo, a extensão longitudinal não é totalmente recuperada após a descarga do pavimento e, também, a velocidade de extensão é maior durante a aproximação da carga do que no seu afastamento. Este comportamento deve-se ao fato que a camada betuminosa apresenta um comportamento visco-elástico, em que sofrem influência do tempo de aplicação de carga e sua intensidade.

Verifica-se, na Figura 6, que o aumento do carregamento por eixo nas duas configurações de pneus aumenta consideravelmente o valor da extensão de tração longitudinal máxima, sendo que o percentual de aumento para o pneu duplo é de aproximadamente 70,4% e para o pneu extra-largo é de 74,7%. Entretanto, o pneu extra-largo apresenta valores superiores de extensão de tração longitudinal máxima quando comparado ao pneu duplo, em ambos os carregamentos por eixo.

Quanto à extensão horizontal no fundo da última camada betuminosa, a Figura 6 ilustra a sua evolução com a intensidade do carregamento e para diferentes configurações de pneus. A análise deste parâmetro é importante para estimar o dano por fadiga das camadas betuminosas.



(c) Pneu duplo



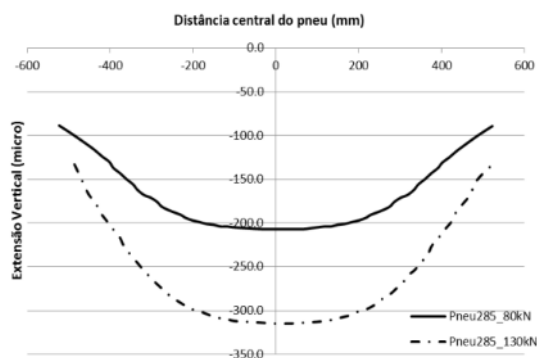
(d) Pneu extra-largo

Figura 6. Extensão horizontal no fundo da camada betuminosa para os dois níveis de carregamento: (a) pneus duplos do tipo 285/80R22,5; (b) pneu extra-largo do tipo 385/65R22,5

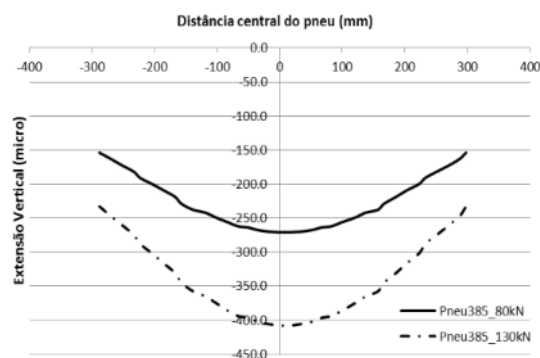
Na Figura 6 verifica-se que os resultados da extensão horizontal apresentam comportamento distintos para os pneus em estudo, que deve-se a diferença da configuração geométrica de cada pneu. Observa-se, ainda, que o pneu duplo apresentou menores valores de extensão horizontal localizado no fundo da última camada betuminosa, independente do carregamento por eixo adotado, quando comparados aos valores do pneu extra-largo. Deve-se, provavelmente, à forma de distribuição do carregamento ser diferenciado para o pneu duplo e extra-largo.

Na Figura 6, ao analisar o percentual do aumento da extensão de tração máxima horizontal na última camada betuminosa, quando submetido a um aumento de carregamento por eixo, temos que a configuração do pneu duplo apresentou um aumento de 64,8% e a configuração do pneu extra-largo apresentou 66% de aumento.

Quanto à extensão vertical no topo do solo de fundação, a Figura 7 ilustra o seu comportamento quanto à intensidade do carregamento para as duas configurações de pneus em estudo. Este parâmetro é importante na avaliação dos pavimentos flexíveis pois estima a deformação permanente originada na camada granular.



(e) Pneu duplo



(f) Pneu extra-largo

Figura 7. Extensão vertical no topo do solo de fundação para os dois níveis de carregamento: (a) pneus duplos do tipo 285/80R22,5; (b) pneu extra-largo do tipo 385/65R22,5

Na Figura 7 observa-se que o pneu extra-largo apresentou maiores níveis de extensão de compressão vertical quando comparado ao pneu duplo, independente da intensidade do carregamento por eixo. Deve-se, provavelmente, a distribuição do carregamento ser mais concentrado no pneu extra-largo em detrimento ao pneu duplo. Ao analisar o aumento percentual da extensão de compressão vertical máxima no topo do solo de fundação, quando submetido a um aumento de carregamento por eixo, verifica-se que a configuração do pneu duplo apresentou um aumento de 65,7% e a configuração do pneu extra-largo apresentou 66,4% de aumento.

CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados para a modelação visco-elástica de um pavimento com aplicação de um veículo com configuração de pneu duplo e pneu extra-largo, em que variou-se a intensidade do carregamento por eixo, pode-se concluir que os resultados obtidos para os parâmetros analisados foram distintos devido a variação geométrica dos pneus e, também, a distribuição do carregamento na interface pneu/pavimento.

Esta análise permitiu concluir que é possível optar por uma configuração geométrica de pneus duplos ou pneus extra-largo no veículo pesado. Entretanto, os pneus duplos apresentam menores efeitos danosos ao pavimento quando comparados aos pneus extra-largos. Conclui-se ainda que o aumento do carregamento por eixo aumenta consideravelmente o estado de tensão-extensão instalado no interior do pavimento, conduzindo à maiores danos.

Da análise realizada verificou-se que distribuição não-uniforme da pressão de enchimento para as duas configurações de pneus estudadas induziu um fluxo de cisalhamento no sentido da borda externa do pneu e uma elevada concentração de extensões de cisalhamento sob os pneus próximo à superfície do pavimento.

Por fim, verifica-se que as degradações nos pavimentos próximas à superfície e no seu interior podem ser amenizadas através da distribuição adequada da carga na área de contacto pneu/pavimento, minimizando, dessa forma, as tensões críticas e consequentes danos nessa região.

AGRADECIMENTOS

A primeira autora agradece à Fundação de Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento da bolsa de doutoramento SFRH/BD/48412/2008, sendo co-financiada pelo Fundo Social Europeu (FSE) através do Programa Operacional Potencial Humano (POPH). O segundo autor agradece o financiamento da Fundação de Ciência e Tecnologia (FCT) ao abrigo dos projetos PEST-OE/ECI/UI4047/2011 e PTDC/ECM/74033/2006.

REFERÊNCIAS

- Al-Qadi, I. L., Loulizi A., Janajreh I., and Freeman, T. E. (2002). Pavement response to dual and new wide-base tires at the same tire pressure. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1806, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 38–47.
- Al-Qadi I. L., Yoo P. J., Elseifi M. A., Janajreh I. (2005). Effects of tire configurations on pavement damage. *Journal of the Association of Asphalt Pavement Technologists*, vol. 58, Long Beach CA, United States.
- De Beer M., C. Fisher C., Kannemeyer L. (2004). Tyre-pavement interface contact stresses on flexible pavements – quo vadis? In: *8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04)*, ISBN Number: 1-920-01718-6 Sun City, South Africa.
- De Beer M., Sadzik E. M., Fisher C., Coetzee C. H. (2005) Tyre-pavement contact stress patterns from the test tyres of the Gautrans Heavy Vehicle Simulator (HVS) MK IV+. In: *24th Southern African Transport Conference (SATC 2005)* ISBN Number: 1-920-01712-7, Pretoria, South Africa.
- Douglas R. A., Alabaster D., Charters, N. (2008). Measured tire/road contact stresses characterized by tire type, wheel load, and inflation pressure. In: *Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, Toronto, Ontario.
- El Sharkawy, S. A., Salem H. M., Wahdan, A. H., Mohammed, M. Y. (2011). Structural and economical effect of overweight trucks on asphalt pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*. ISSN 1997-1400.
- Myers, L. A., Roque, R. and Birgisson, B. (2001). Propagation mechanisms for surface-initiated longitudinal wheel path cracks. *Transportation Research Record* 1778, TRB, National Research Council, Washington D.C., pp. 113-122.
- Wang, G., Roque, R. (2011). Evaluation of truck tire types on near-surface pavement response based on finite element analysis. *International Journal of Pavement Research and Technology*. ISSN 1997-1400.
- Xia (2010). A Finite element model for tire/pavement interaction: application to prediction pavement damage. *International Journal of Pavement Research and Technology*. ISSN 1997-1440.