



20-25 novembro 2011 • Rio de Janeiro • Brasil

IBP2533_11 O TIPO DE MODELAÇÃO DOS PNEUS DOS VEÍCULOS PESADOS NA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS

Aline C. Vale¹, Jorge C. Pais², Paulo A. A. Pereira³

Copyright 2011, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação no *XVI CILA – Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto*, realizada no período de 20 a 25 de novembro de 2011, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais do *XVI CILA – Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto*.

Resumo

Os veículos pesados são os principais responsáveis pela degradação dos pavimentos rodoviários provocando principalmente fendilhamento por fadiga e deformações permanentes. Os pavimentos rodoviários são dimensionados para suportar o tráfego de projecto, o qual é composto por diferentes tipos de veículos com diferentes tipos de eixos e rodas, sendo a carga total do veículo função de vários factores. Alguns destes veículos pesados causam maiores degradações nos pavimentos devido ao tipo de suspensão, tipo de pneu, localização dos eixos ou pressão de enchimento dos pneus. No entanto, em termos de dimensionamento, esta diversidade de veículos é considerada de modo semelhante pela atribuição de uma área onde é aplicada a carga dos veículos, verificando-se que a configuração desta área não representa correctamente o contacto dos pneus com o pavimento.

Deste modo, este trabalho pretende estudar a acção dos veículos pesados na avaliação do comportamento do pavimento considerando a carga dos veículos pesados modelada de forma mais aproximada da real, nomeadamente, considerando os sulcos dos pneus e a variação não uniforme da pressão de contacto pneu-pavimento. Assim, neste trabalho é modelado um pavimento representativo da rede rodoviária no qual são aplicadas diferentes configurações de carga sendo obtido o estado de tensão/deformação instalado no pavimento. A modelação numérica do pavimento foi realizada utilizando um modelo elástico linear de elementos finitos em três dimensões desenvolvido para analisar a influência de um veículo pesado possuindo uma configuração de pneus duplos com 245mm de largura. Neste estudo foram consideradas duas configurações de distribuição de pressões de contacto, em que foram considerados as seguintes pressões totais: 700, 800, 900, 1200 e 1500 kPa. Com base nos resultados obtidos é possível observar as diferenças significativas no estado de tensão/deformação do pavimento, principalmente à superfície a qual poderá ser responsável pelo fendilhamento com origem à superfície.

Abstract

Road pavements have been designed to support the design traffic which is composed by different type of vehicles with different axle configurations, load magnitudes, wheel types and tire inflation pressures. Traffic loads are the major source of pavement damage by causing fatigue, which leads to cracking and permanent deformation. Heavy vehicles do not cause equal damage because the differences in wheel loads, number and location of axles, types of suspensions and tires. Furthermore, the damage is specific to the pavement properties, operating conditions and environmental factors. This research proposes a model for predicting the mechanical behaviour of flexible pavement subjected to heavy load vehicle with dual-tire configuration using a numerical simulation. An elastic finite element model in three dimensions (3D) was developed to analyze the influence of a heavy vehicle with dual-tire configuration featuring 245 mm wide on each tire. This research studied three configurations of contact pressure considering the following pressures: 700, 800, 900, 1200 and 1500 kPa. The results show that it is possible to observe significant differences in the state of stress/strain on the pavement, especially on the surface which is responsible for cracking originating at the surface. The simulation model present here will be useful for future pavement design and material selection.

1. Introdução

¹ Doutoranda em Engenharia Civil – Universidade do Minho/Portugal

² Ph.D., Engenharia Civil – Professor Associado – Universidade do Minho/Portugal

³ Ph.D., Engenharia Civil – Professor Catedrático – Universidade do Minho/Portugal

O dimensionamento de um pavimento envolve um compromisso entre a capacidade estrutural e o custo de manutenção. 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 o pavimento provocando-lhe danos. Com esses fundamentos é possível regulamentar os tipos de veículos pesados que são permitidos em determinadas estradas e quais as estradas mais resistentes às degradações provocadas pelos veículos pesados.

A interação dos veículos pesados sobre os pavimentos dá-se através da área de contacto pneu-pavimento sobre a qual são aplicadas as cargas dos veículos pesados. Estas cargas são transmitidas ao pavimento por meio de pneus simples no eixo dianteiro e pneus simples, duplos ou extra-largos nos demais eixos.

Vários estudos teóricos e experimentais desenvolvidos nos últimos anos têm verificado que a área de contacto pneu-pavimento pode apresentar configurações, aproximadamente, circulares ou retangulares dependendo do tipo, tamanho ou estado do pneu, considerando ainda o efeito dos sulcos presentes nestes. Em tais investigações verificou-se, ainda, que, nas áreas de contacto pneu-pavimento, as pressões de contacto do pneu não se distribuem de modo uniforme.

Diante do exposto anteriormente, esta investigação tem como objectivo estudar a acção dos veículos pesados na avaliação do comportamento do pavimento considerando diferentes configurações da área de contacto dos pneus dos veículos pesados no pavimento de forma mais aproximada da real, nomeadamente considerando os sulcos dos pneus e a variação não uniforme da pressão de contacto pneu-pavimento.

Assim, neste trabalho utilizou-se o programa de elementos finitos DIANA® para desenvolver um modelo de pavimento em três dimensões, considerando o comportamento elástico linear dos materiais das várias camadas, no qual é modelado um pneu duplo de dimensão 245 mm de largura considerando 2 configurações de pressão de contacto: i) pressão uniforme; ii) pressão não-uniforme. Para estas pressões foram consideradas 2 geometrias de carregamento: i) retangular; ii) arredondada. Os pneus foram modelados com e sem sulcos. Quanto à pressão de enchimento foram considerados 5 valores: 700, 800, 900, 1200 e 1500 kPa.

Os resultados obtidos permitiram observar o estado de tensão-deformação instalado no interior do pavimento quando submetido à diferentes configurações geométricas do pneu e intensidades de pressão de contacto, principalmente à superfície a qual poderá ser responsável pelo fendilhamento com origem à superfície.

2. Revisão Bibliográfica

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 contacto entre o pneu e o pavimento, influenciando significativamente o estado de tensão/deformação instalado no pavimento, o qual conduz a maiores degradações no pavimento.

A passagem de veículos representa a principal acção à qual os pavimentos são submetidos. A configuração desta carga tem sido foco de muitos estudos (Al-Qadi *et al.*, 2002; Al-Qadi *et al.*, 2005; Douglas *et al.*, 2008).

Diversas investigações (Blackman *et al.*, 2000; Blad e Harvey, 2002; Hua e White, 2002) forneceram estudos abrangentes no que diz respeito a distribuição da pressão de contacto dos pneus dos veículos pesados no pavimento. Estes estudos mostraram, também, que as cargas não são igualmente distribuídas no pavimento de acordo com a Figura 1, para o caso de um veículo ligeiro de passageiros e dois veículos pesados.

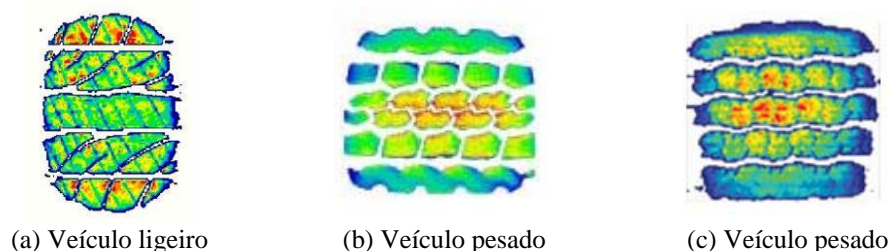


Figura 1. Distribuição da pressão de contacto pneu/pavimento para vários tipos de pneus (Tekscan, Inc.)

Elseifi *et al.* (2005) realizaram uma investigação em que avaliaram o comportamento do pavimento quando aplicado carregamentos de veículos pesados com pneus duplos (275/80R22,5) e extra-largos (445/50R22,5) tendo observado o estado de tensão e extensão instalado no pavimento devido à aplicação dos dois tipos de pneus, concluindo que os pneus extra-largos apresentaram maiores danos no pavimento em comparação aos pneus duplos. Segundo Soares *et al.* (2008), o uso dos pneus duplos apresenta melhor desempenho no pavimento quando comparado aos pneus do tipo extra-largos. Nesta pesquisa foi simulado o efeito de três configurações de pneus (simples, duplos e extra-largos) utilizando o método dos elementos finitos para prever o comportamento mecânico e a vida útil de um pavimento.

Os investigadores De Beer *et al.* (2004) mostraram uma melhor definição da interacção das cargas dos veículos pesados sobre uma estrutura de pavimento flexível. Neste trabalho foi utilizado um conjunto de sensores (Stress-In-Motion--SIM) capazes de medir a pressão de contacto e força aplicada pelos veículos pesados para ilustrar a aplicação das cargas sobre a estrutura do pavimento, como ilustra a Figura 2a. Este sistema (SIM) foi originalmente desenvolvido para a obtenção dos valores em três dimensões das pressões de contacto devido à interacção pneu-pavimento, como ilustra a Figura 2b.

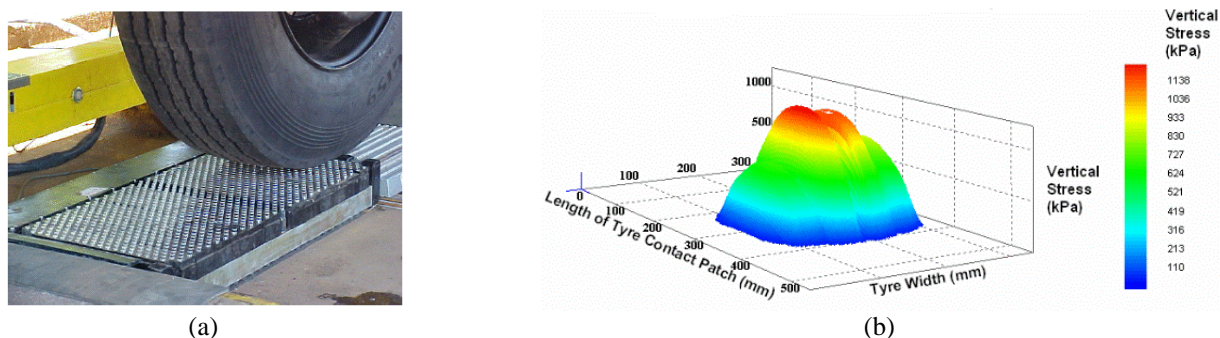


Figura 2. (a)Conjunto de sensores “Stress-In-Motion” (SIM); (b) ilustração em 3D das pressões de contacto pneu-pavimento (De Beer *et al.*, 2004)

De Beer *et al.* (2005) analisaram as pressões de contacto aplicadas no pavimento por dois tipos de pneus (pneu duplo 12R22,5 e pneu simples 315/80 R22,5) utilizando um simulador de veículos pesados, e observaram que as pressões de contacto apresentam-se de modo não-uniforme no pavimento formando gráficos do tipo “m” e “n”, como ilustra a Figura 3, respectivamente.

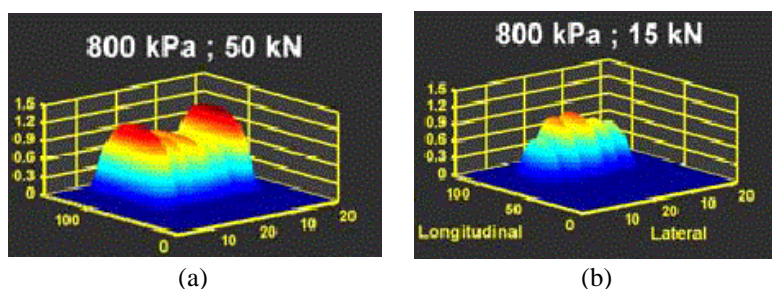


Figura 3. Pressão de contacto para pneu 12R22,5: (a) tipo “m”; (b) tipo “n” (De Beer *et al.*, 2005)

A abordagem proposta Al-Qadi *et al.* (2005) envolveu uma simulação em elementos finitos da área de contacto pneu-pavimento com o intuito de avaliar o nível de carregamento e da pressão de contacto pneu-pavimento considerando a presença dos sulcos existentes nos pneus. A Figura 4 ilustra a área de contacto pneu-pavimento para uma configuração de pneus duplos e, posteriormente, apresenta a modelação da pressão de contacto em cada nervura do pneu que foi incorporada na simulação de elementos finitos. Esta investigação adoptou um carregamento de 36,7 kN e uma pressão nominal de enchimento de 720 kPa para uma configuração de pneus duplos, pressupondo que a pressão de contacto seria equivalente à pressão de enchimento. Os resultados foram comparados com a configuração de pneu extra-largo considerando o mesmo carregamento e pressão de enchimento tendo observado que os pneus extra-largos apresentaram maiores danos no pavimento quando comparados aos pneus duplos.

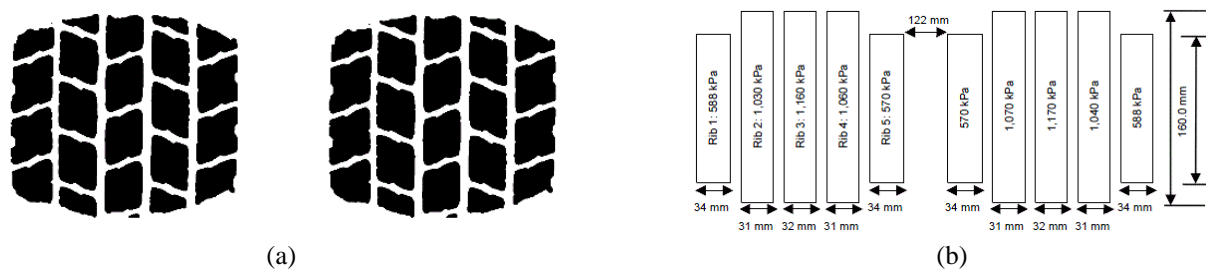


Figura 4. (a) Área de contacto pneu-pavimento de uma configuração de pneus duplos; (b) simulação da área de contacto pneu-pavimento para um carregamento de 36,7 kN e uma pressão nominal de enchimento de 720 kPa (Al-Qadi *et al.*, 2005)

3. Metodologia

3.1. Modelação do Pavimento

As camadas betuminosas de um pavimento revelam a capacidade deste suportar as cargas provenientes do tráfego a que está submetido, além das condições de conforto e segurança oferecidas aos utentes da estrada. Os pavimentos flexíveis têm tido o seu comportamento comprometido em algumas situações onde o aumento do volume de veículos e do excesso de carga são elevados, causando deterioração prematura e, em consequência, aumento nos custos da reabilitação da rede rodoviária.

Este trabalho tem como objectivo analisar o comportamento de um pavimento quando submetido ao carregamento de veículos pesados para diferentes condições de carregamento. Para tal, foi adoptado um modelo de elementos finitos tridimensional com elementos cúbicos de 8 nós utilizando o programa comercial DIANA®.

As dimensões do modelo adoptado foram 6m × 6m, como ilustrado na Figura 5. Esta dimensão foi seleccionada com intuito de reduzir os efeitos de bordo, tendo sido modeladas três camadas betuminosas, uma camada de base e o solo de fundação. Para as camadas betuminosas foram consideradas as propriedades de uma mistura betuminosa produzida a quente e para as camadas de base e fundação foram considerados as suas propriedades elásticas obtidas através da análise inversa de uma secção teste em estudo numa estrada em serviço. Todas as camadas foram modeladas considerando o seu comportamento elástico linear e isotrópico dos seus materiais.

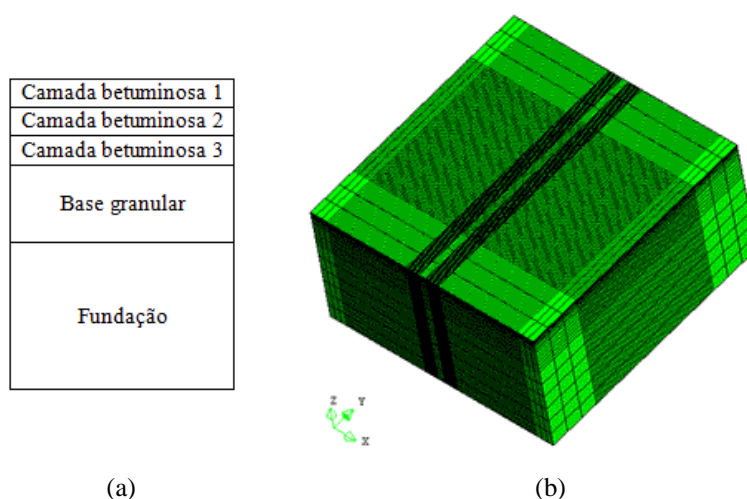


Figura 5. (a) Representação esquemática do pavimento modelado e (b) Modelo em 3D do pavimento modelado no programa de elementos finitos DIANA®

Na Tabela 1 apresentam-se as propriedades elásticas adoptadas por cada camada na modelação do pavimento. As espessuras mantiveram-se constantes durante a simulação do modelo.

Tabela 1. Propriedades das camadas adoptadas na modelação do pavimento

Camadas	Módulo de rigidez (MPa)	Coefficiente de Poisson	Espessura (cm)
Camada betuminosa 1	4000	0,35	5
Camada betuminosa 2	5000	0,35	7
Camada betuminosa 3	6000	0,35	12
Base granular	400	0,40	20
Fundação	100	0,45	150

3.2. Modelação do Pneu dos Veículos Pesados

Esta pesquisa tem como objectivo simular uma configuração de pneu duplo apresentando 245 mm de largura em cada pneu. Para o desenvolvimento do modelo foram consideradas cinco intensidades de pressão de enchimento (700, 800, 900, 1200 e 1500 kPa) tendo duas formas diferenciadas de aplicação da pressão (uniforme (Figura 6a) e não-uniforme (Figura 6b)), em confronto com a aplicação de carga numa área contínua (Figura 6c). Em cada configuração de pneu duplo foi aplicada uma força de 40 kN, considerando um eixo-padrão de 80 kN. Posteriormente foi analisado o comportamento do estado de tensão/deformação instalado no pavimento considerando os sulcos presentes nos pneus.

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. A Figura 6 ilustra a modelação da área de contacto pneu/pavimento e as diferentes configurações de pressão de enchimento para o caso da pressão nominal de enchimento de 700 kPa. Para as restantes pressões de enchimento, a configuração da carga foi obtida de forma proporcional à considerada para a configuração de 700 kPa.

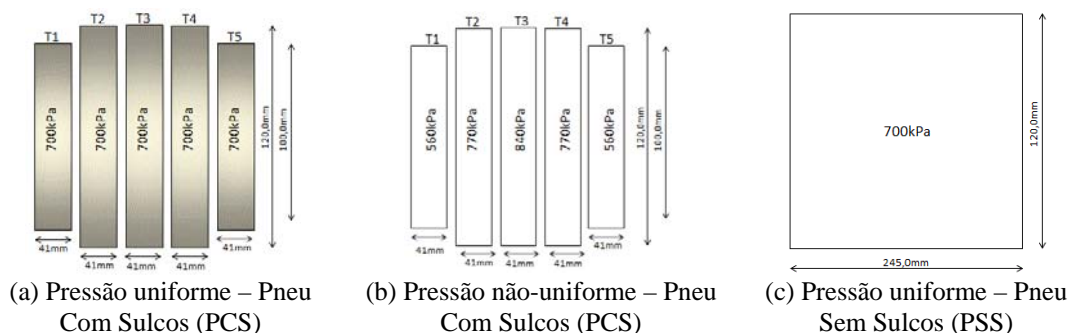


Figura 6. Configuração de pneus com/sem sulcos considerando pressão nominal de enchimento de 700 kPa: (a) pressão uniforme – pneu com sulcos (PCS); (b) pressão não-uniforme – pneu com sulcos (PCS); (c) pressão uniforme – pneu sem sulcos (PSS)

Na Tabela 2 ilustra-se a área de contacto pneu/pavimento para cada variação de pressão de enchimento para uma configuração de pneu duplos com 245mm de largura em cada pneu. Em geral, a área de contacto diminui com o aumento da pressão de enchimento considerando o valor do carregamento constante (40 kN).

Tabela 2. Área de contacto pneu/pavimento de uma configuração de pneus duplos (245mm de largura) mantendo o carregamento constante

Pressão de enchimento (kPa)	Área de contacto pneu/pavimento (mm ²)
700	28 571
800	25 000
900	22 222
1200	16 667
1500	13 334

3.3. 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 estático de uma configuração de pneu duplo, com 245 mm de largura em cada pneu, em um pavimento submetido a cinco diferentes intensidades de pressões de enchimento (700, 800, 900, 1200 e 1500 kPa) e três formas de variação geométrica do pneu duplo considerando a pressão de enchimento uniforme e não-uniforme.

No modelo tridimensional do pavimento foram investigados os seguintes parâmetros:

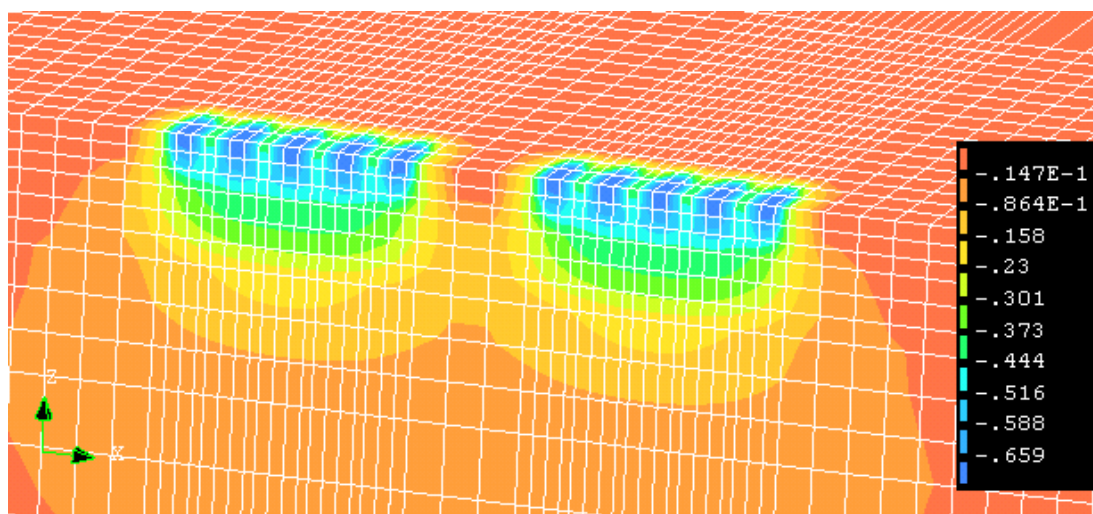
- Tensão vertical na superfície do pavimento sob os pneus duplos;
- Extensão horizontal no fundo da última camada betuminosa;
- Extensão vertical no topo da camada de fundação;
- Extensão de corte vertical máxima sob os pneus duplos;
- Tensão e extensão de corte calculado a partir do Critério de Von Mises sob os pneus duplos.

4. Resultados e Análises

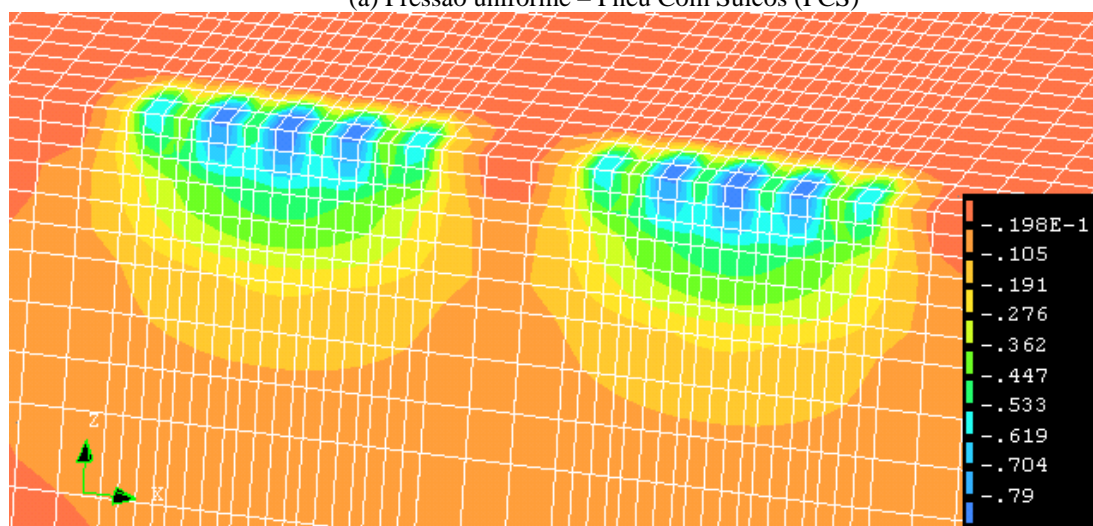
A modelação do comportamento do pavimento perante as condições de carregamento definidas acima permitiu obter os resultados que se apresentam neste capítulo os quais são analisados em termos do que se verifica no plano vertical transversal à estrada que passa pelo eixo de simetria dos pneus.

Na Figura 7 é apresentada a distribuição das tensões verticais instaladas no pavimento para os 3 tipos de configuração de carga considerando uma carga de 40 kN e uma pressão de enchimento de 700 kPa sendo possível observar a distribuição das tensões é muito semelhante para as 3 configurações de carga. Isto era de esperar uma vez que a carga aplicada (total) é igual nas várias modelações. No entanto, verifica-se que junto à superfície do pavimento se verificam

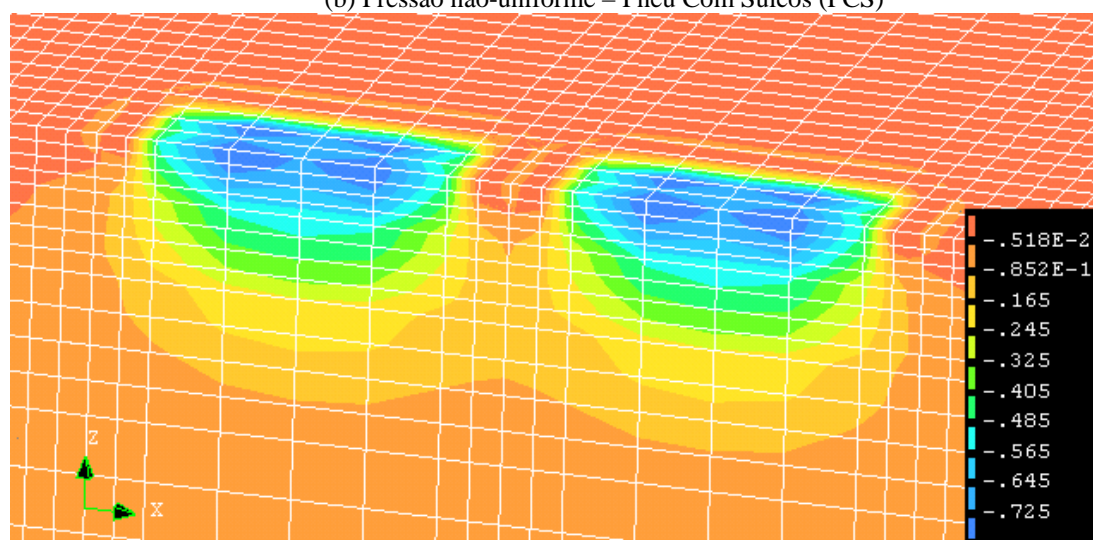
diferenças no estado de tensão instalado à superfície no pavimento, tal como seria de esperar, sendo objetivo deste identificar estas diferenças e concluir das consequências que daqui podem advir para o comportamento do pavimento.



(a) Pressão uniforme – Pneu Com Sulcos (PCS)



(b) Pressão não-uniforme – Pneu Com Sulcos (PCS)



(c) Pressão uniforme – Pneu Sem Sulcos (PSS)

Figura 7. Distribuição de tensões verticais no interior do pavimento sob a configuração de pneus duplos para cada caso estudado com 700 kPa de pressão de enchimento e um carregamento constante de 40 kN

O estado de tensão instalado no pavimento pode também ser observado a partir da Figura 8 em que se representa a tensão vertical à superfície do pavimento sendo possível observar a influência da configuração do carregamento no comportamento do pavimento, em que no caso da modelação dos sulcos dos pneus pode verificar-se uma maior tensão instalada no pavimento, dependendo do perfil de pressões de contacto verificadas entre o pneu e o pavimento.

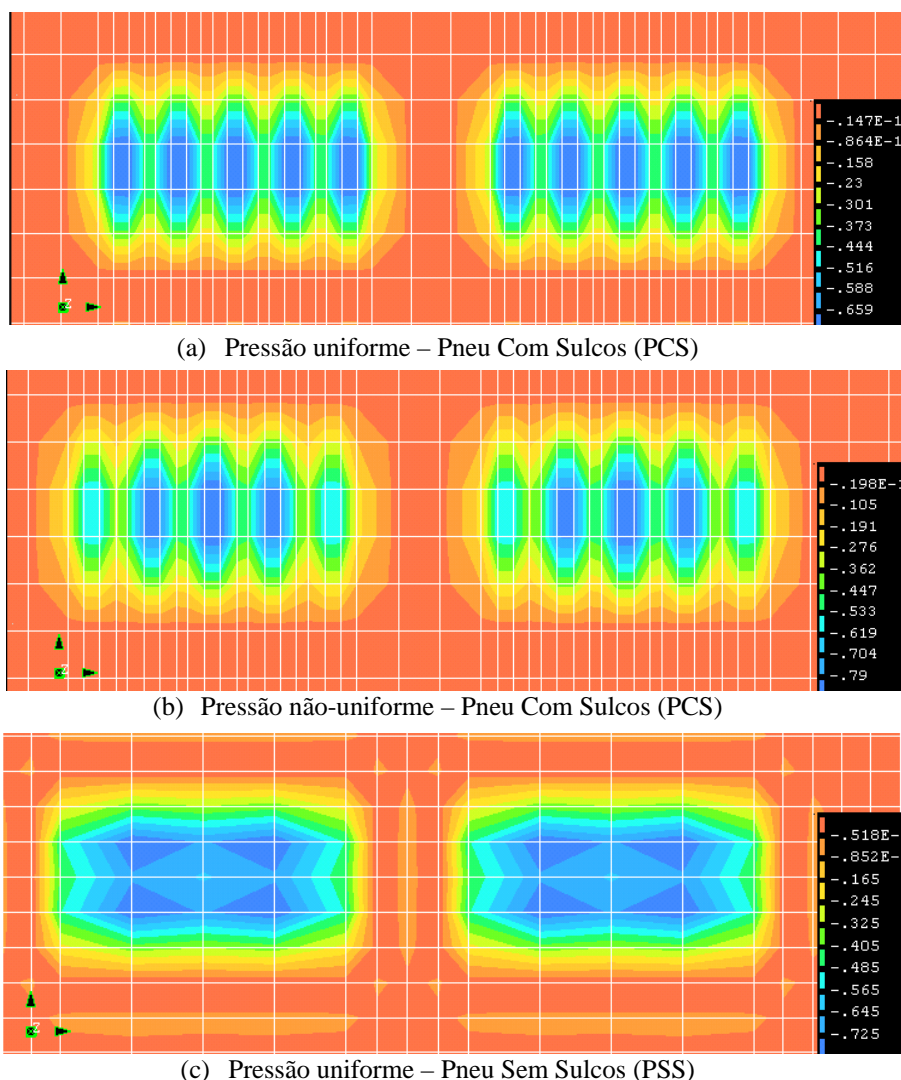


Figura 8. Tensões verticais vista na superfície do pavimento sob uma configuração de pneus duplos para cada caso estudado com 700 kPa de pressão de enchimento e um carregamento constante de 40 kN

A distribuição horizontal das tensões verticais na superfície do pavimento como resultado de um carregamento de pneus duplos considerando uma carga de 40 kN e uma pressão de enchimento de 700 kPa, para as três formas geométricas apresentadas na Figura 6 é representada na Figura 9, onde se observa que na superfície do pavimento sob a configuração de pneus duplos, a maior tensão vertical ocorreu abaixo da trilha do pneu, como era esperado.

Quanto à influência da configuração da carga, verifica-se que a modelação dos sulcos, quando a distribuição de pressões de contacto não é uniforme, aumenta a tensão instalada no pavimento, podendo este aumento ser, para o caso em análise, da ordem dos 20%.

Quanto à extensão de corte vertical, a qual associada à componente vertical, poderá ser responsável pelo aparecimento de fendilhamento à superfície do pavimento, a Figura 10 ilustra esquematicamente a distribuição da extensão de corte vertical máxima dentro da camada betuminosa sob uma configuração de pneus duplos com carregamento de 40 kN e pressão de enchimento de 700 kPa. A extensão de corte vertical máxima foi analisada na parte superior da camada betuminosa na borda do pneu para as três configurações geométricas estudadas, apresentada na Figura 6. Observa-se que as extensões verticais resultantes do carregamento não-uniforme de pneus duplos com sulcos (PCS) causam um maior esforço de corte no pavimento próximo à superfície que as demais configurações. Uma elevada extensão de corte e um baixo confinamento na borda do pneu indicam que as tensões verticais de contacto podem causar significativos danos de fendilhamento por fadiga ou por corte com origem na superfície do pavimento.

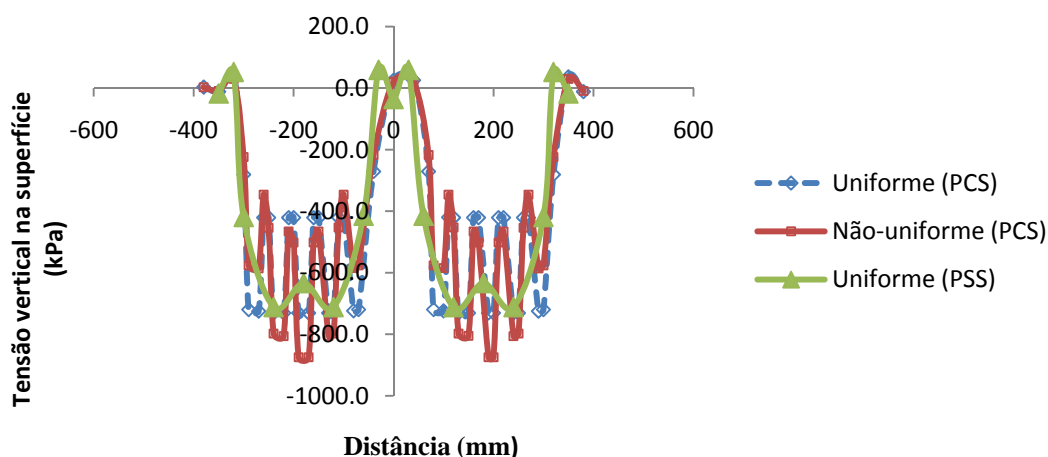
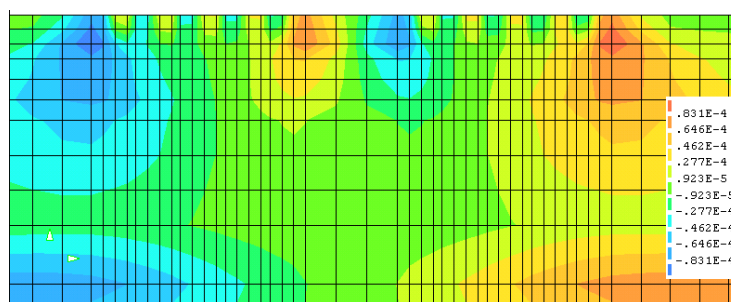
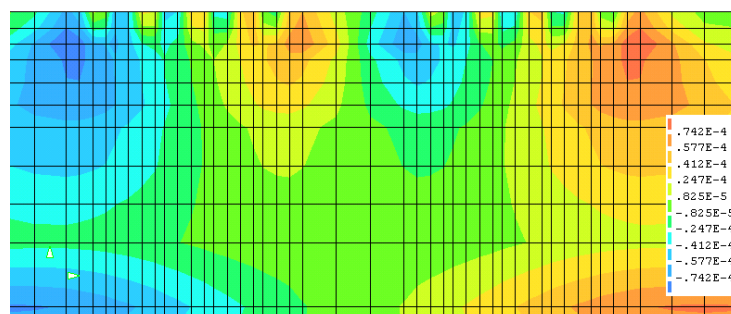


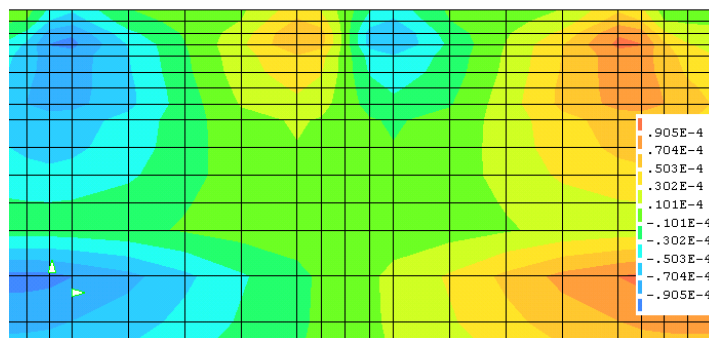
Figura 9. Distribuição horizontal das tensões verticais na superfície do pavimento sob a configuração de pneus duplos considerando a pressão de enchimento uniforme e não-uniforme e a presença ou não de sulcos nos pneus



(a) Pressão uniforme – Pneu Com Sulcos (PCS)



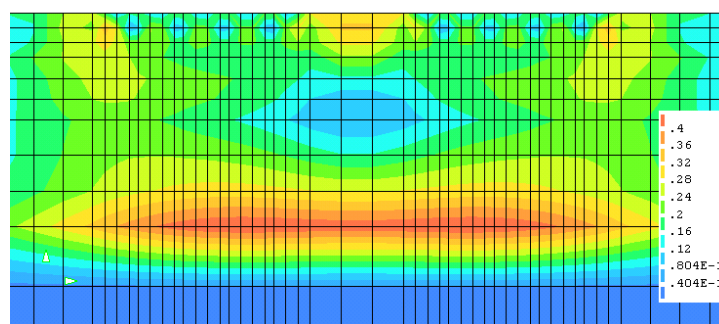
(b) Pressão não-uniforme – Pneu Com Sulcos (PCS)



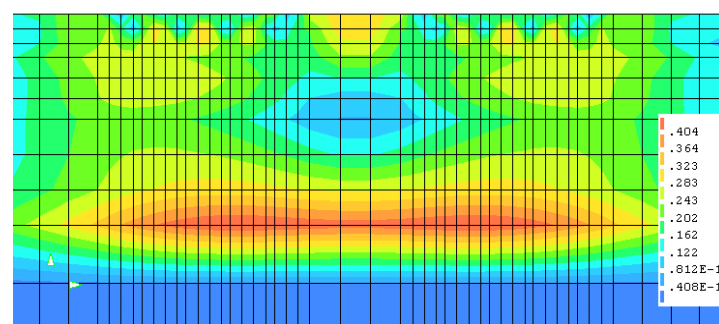
(c) Pressão uniforme – Pneu Sem Sulcos (PCS)

Figura 10. Distribuição esquemática da extensão vertical de corte no interior do pavimento sob a configuração de pneus duplos para cada variação geométrica do pneu considerando uma pressão de enchimento de 700 kPa

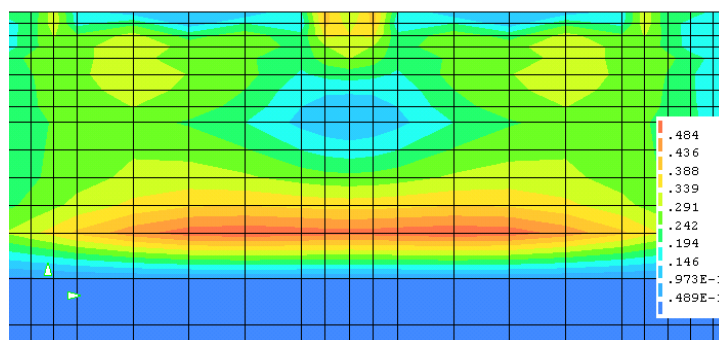
Na Figura 11 apresenta-se outra possibilidade de análise da formação de danos de fendilhamento por fadiga ou por corte com origem na superfície do pavimento. Trata-se do critério de Von Mises ou também conhecido como o Critério de Tensão de Corte Octaédrica Máxima. Esta figura ilustra esquematicamente a distribuição da tensão de corte octaédrica máxima dentro da camada betuminosa sob uma configuração de pneus duplos considerando o carregamento de 40 kN e pressão de enchimento de 700 kPa para cada configuração geométrica estudada. Este critério permite avaliar o potencial fluxo de corte na camada betuminosa sem considerar a deformação permanente, observando-se que na configuração de pneus duplos com sulcos (PCS) com carregamento não-uniforme, a tensão de corte octaédrica máxima abaixo do carregamento dos pneus duplos é relativamente maior quando comparada às outras configurações. Além disto verifica-se uma elevada concentração de tensões de corte octaédrica no fundo da última camada betuminosa, como também significativos valores de tensão na borda externa e interna da configuração de pneus duplos para todos os casos analisados.



(a) Pressão uniforme – Pneu Com Sulcos (PCS)



(b) Pressão não-uniforme – Pneu Com Sulcos (PCS)



(c) Pressão uniforme – Pneu Sem Sulcos (PCS)

Figura 11. Distribuição esquemática da tensão de corte octaédrica máxima no interior do pavimento sob a configuração de pneus duplos para cada variação geométrica do pneu considerando uma pressão de enchimento de 700 kPa

A Figura 12 ilustra esquematicamente a extensão de corte calculada a partir do critério de Von Mises no interior do pavimento sob uma configuração de pneus duplos considerando o carregamento de 40 kN e pressão de enchimento de 700 kPa para cada caso ilustrado na Figura 6. Observa-se que a configuração não-uniforme da pressão de enchimento dos pneus duplos com sulcos (PCS) apresentou um elevado nível de extensões localizado logo abaixo da configuração dos pneus duplos em comparação às demais configurações. Pode verificar-se que as tensões de corte (Figura 11) causam maiores esforços de corte quando comparadas as extensões de corte localizados na nesta região, ou seja abaixo da configuração de pneus duplos.

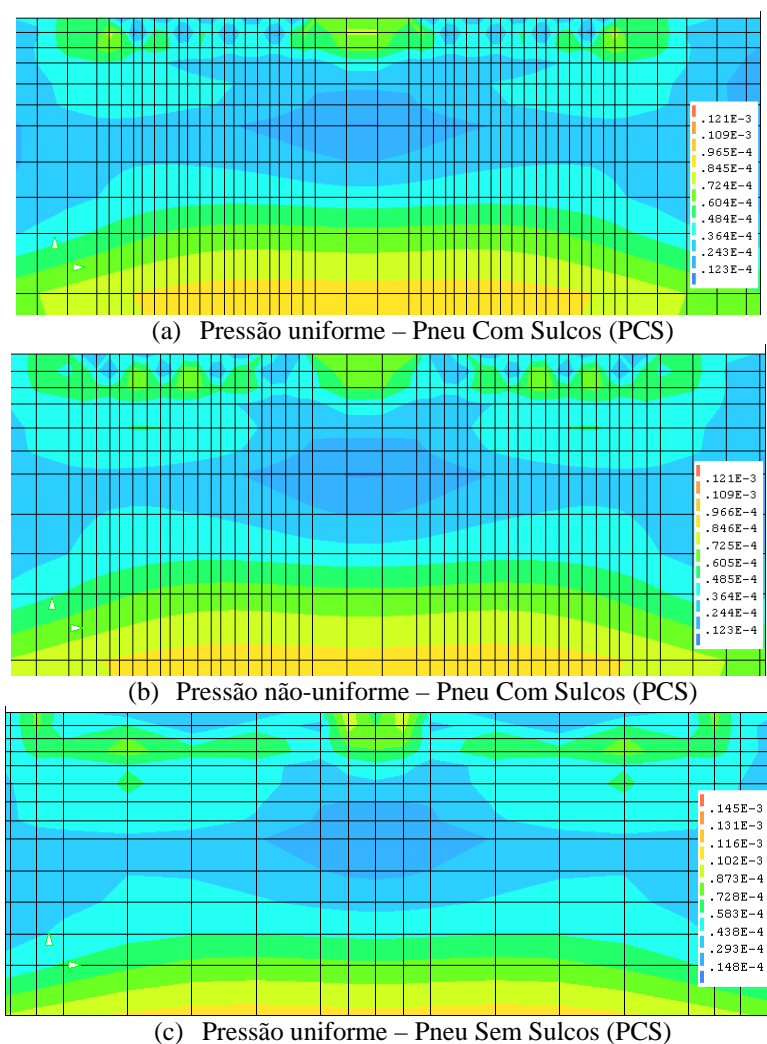
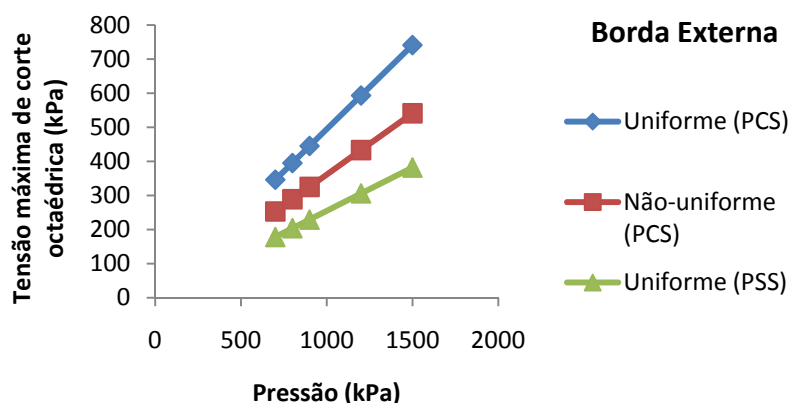


Figura 12. Distribuição esquemática da extensão de corte no interior do pavimento sob a configuração de pneus duplos para cada variação geométrica do pneu considerando uma pressão de enchimento de 700 kPa calculada a partir do Critério de Von Mises

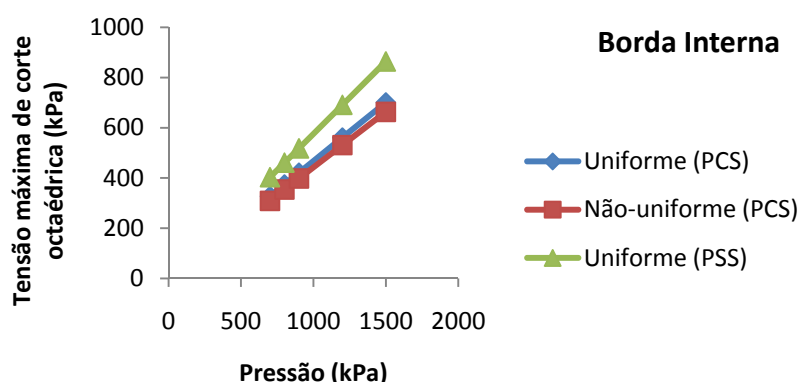
A Figura 13 ilustra os valores das tensões máximas de corte octaédrica localizadas na borda externa e interna da configuração de pneus duplos, respectivamente, para diferentes intensidades e distribuição de pressões de enchimento considerando um carregamento de 40 kN constante. Observa-se que a configuração de pneus com sulcos (PCS) e pressão uniforme apresentou consideravelmente uma elevada concentração de tensões na borda externa da configuração de pneus duplos para as várias intensidades de pressão de enchimento que deve-se ao facto da configuração geométrica das cargas aplicadas na superfície do pavimento. Entretanto ao avaliar as tensões máximas de corte localizadas na borda interna da configuração de pneus duplos verifica-se que a configuração de pneus duplos sem sulcos (PSS) com pressão uniforme apresentou uma elevada tensão de corte em comparação as demais configurações e, também, as configurações de pneus duplos com sulcos (PCS) apresentaram resultados equivalentes.

Neste trabalho foi realizada também uma análise ao estado de tensão instalado no pavimento que é utilizado para o seu dimensionamento, ou seja a extensão horizontal no fundo do conjunto das camadas betuminosas e a extensão vertical no topo da camada de fundação. Esta análise permite concluir se as diferentes configurações de carregamento têm influência significativa no dimensionamento dos pavimentos.

Quanto à extensão horizontal no fundo das camadas betuminosas, a Figura 14 ilustra a sua evolução com a intensidade de carregamento, observando-se que os resultados para as várias configurações geométricas do pneu duplo com sulcos (PCS) são coincidentes. Verifica-se que os resultados são similares quando se aplica carga uniforme ou não-uniforme na área de contacto do pneu/pavimento. Porém, ao analisar a variância geométrica do pneu duplo sem sulcos (PSS) verifica-se que os valores das extensões horizontais localizados no fundo da última camada betuminosa são relativamente maiores quando comparados às outras configurações de pneus duplos.



(a) Valores de tensão de corte octaédrica localizada na borda externa da configuração de pneus duplos



(b) Valores de tensão de corte octaédrica localizada na borda interna da configuração de pneus duplos

Figura 13. Tensão de corte octaédrica localizada na borda externa da configuração de pneus duplos para diferentes intensidades e distribuição de pressões de enchimento

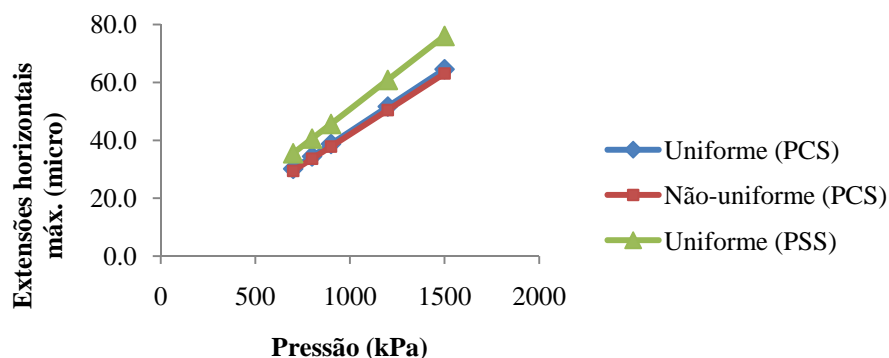


Figura 14. Extensão horizontal localizada na base da última cada betuminosa para diferentes intensidades e configuração de pressão de enchimento

Quanto à extensão vertical no topo da camada de fundação, a Figura 15 avalia a sua evolução com a pressão de enchimento e para as 3 configurações de carregamento, observando-se que os resultados de extensões foram semelhantes quando aplicada a carga uniforme e não-uniforme na área de contacto pneu/pavimento considerando a configuração geométrica do pneu duplo com sulcos (PCS). Entretanto, a configuração geométrica do pneu duplo sem sulcos (PSS) apresentou valores significativamente maiores quando comparados às outras configurações de pneus duplos. Observa-se, ainda, que a configuração de pneus duplos associado a maior pressão de contacto pneu/pavimento causou relativamente maiores danos que as outras pressões de contacto independente da distribuição uniforme e não-uniforme da pressão de enchimento ou da variação geométrica do pneu duplo.

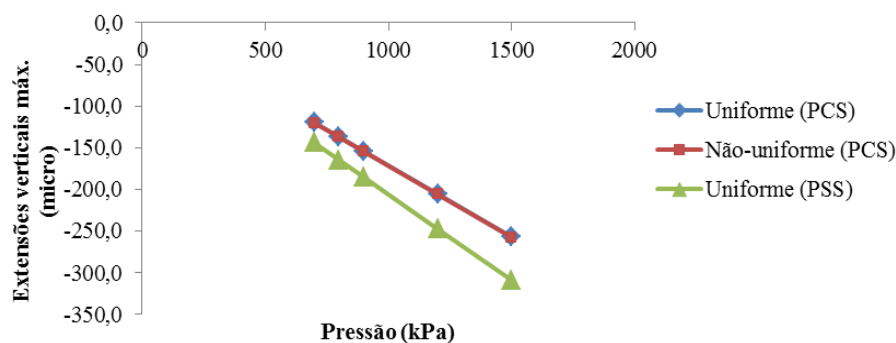


Figura 15. Extensão vertical localizada no topo da camada de fundação para diferentes intensidades e distribuição de pressões de enchimento

5. Conclusões

Diante dos resultados apresentados para a modelação elástica de um pavimento com aplicação de um veículo pesado com configuração de pneus duplos, em que se variou as intensidades e forma de aplicação da pressão de enchimento, pode concluir-se que os resultados obtidos para os parâmetros analisados foram semelhantes considerando as variações geométricas de pneus duplo com sulcos (PCS). Entretanto, os resultados para a variação geométrica dos pneus duplos sem sulcos (PSS) foram relativamente superiores em comparação às outras configurações de pneus duplos.

Esta análise permitiu concluir que é possível optar por uma configuração geométrica de pneus duplos com sulcos (PCS) independente da distribuição uniforme ou não-uniforme da pressão de enchimento, pois conduz a resultados semelhantes quando se analisa as camadas mais profundas da estrutura do pavimento. Porém ao analisar o comportamento do pavimento à sua superfície verifica-se uma elevada diferença no estado de tensões de corte localizadas na borda externa da configuração de pneu duplo.

Conclui-se ainda que a variação do estado de tensão no pavimento com a pressão de contacto segue uma lei linear sendo isto já esperado dado a modelação do pavimento ter sido realizada considerando o comportamento elástico linear dos materiais.

Da análise realizada verificou-se que distribuição não-uniforme da pressão de enchimento da configuração de pneus duplos com sulcos (PCS) induziu um fluxo de corte no sentido da borda externa do pneu e uma elevada concentração de extensões de corte sob os pneus duplos próximo à superfície do pavimento. O aumento do carregamento no pneu em sua maioria aumenta as tensões de contacto do pneu sob pavimento e correspondentemente as extensões de corte e as tensões de corte octaédrico sob as tiras dos pneus.

Por fim, verifica-se que as degradações nos pavimentos podem ser controladas através da distribuição adequada da carga na área de contacto pneu/pavimento, minimizando, dessa forma, as tensões críticas e consequentes danos nessa região.

7. Agradecimentos

A primeira autora agradece à Fundação de Ciência e Tecnologia (FCT) pela bolsa de doutoramento SFRH/ BD/ 48412/2008. O segundo e terceiro autores agradecem o financiamento da Fundação de Ciência e Tecnologia ao abrigo dos projetos PEst-OE/ECI/UI4047/2011 e PTDC/ECM/74033/2006.

8. Referências Bibliográficas

- AL-QADI, I. L., A. LOULIZI, I. JANAJREH, AND T. E. FREEMAN. 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, 2002.
- AL-QADI I. L., YOO P. J., ELSEIFI M. A., JANAJREH I. Effects of tire configurations on pavement damage. *Journal of the Association of Asphalt Pavement Technologists*, vol. 58, Long Beach CA, United States, 2005.
- BLACKMAN, D. I., HALLIDAY, A. R., MERRILL, D. B. Effects of type tire, inflation pressure and load on contact area and pavement performance. *TRL Project Report PR/IP/66/00*, jun, 2000.
- BLAD, R., HARVEY, J. T., Modeling measured 3D tire contact stresses in a viscoelastic FE pavement model. In: *International Journal of Geomechanics*, vol. 2 Issue 3, jun, 2002.

- DE BEER M., C. FISHER C., KANNEMEYER L. 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, set., 2004.
- DE BEER M., SADZIK E. M., FISHER C., COETZEE C. H. 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, jul, 2005.
- DOUGLAS R. A., ALABASTER D., CHARTERS, N. 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, 2008
- ELSEIFI M. A, AL-QADI I. L., YOO P. J., JANAJREH I. Quantification of pavement damage caused by dual and wide-base tires. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1940, Transportation Research Board of the National Academies*, Washington, D.C., pp. 125–135, 2005.
- HUA, J., WHITE, T. A. Study of nonlinear tire contact pressure effects on HMA rutting. In: *International Journal of Geomechanics*, vol.2 Issue 3, p353, 24p, jun, 2002.
- SOARES R. F., ALLEN D. H., KIM Y. R., BERTHLOT C., SOARES J. B., RENTSCHLER M. E. A computational model predicting the effects of tire configuration on asphaltic pavement life. In: *Road Materials and Pavement Design*, vol.9, N°.2/2008, pages 271-289, Paris, França, 2008.
- TEKSCAN, INC. disponível em www.tekscan.com.