



## ANÁLISE DINÂMICA DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS: EFEITO DA VELOCIDADE E PRESSÃO DOS PNEUS NAS TENSÕES E DEFLEXÕES

N. Figur<sup>1</sup>; F. D. Vicentini<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *Universidade Federal do Paraná, Av. Cel. Francisco H. do Santos, 210  
Jd. das Américas, Curitiba/PR, CEP 81530-000*

**Resumo:** Tendo em vista a importância dos pavimentos asfálticos no país, é necessária a realização de estudos que abordem, com maior precisão, os esforços a que os mesmos estão submetidos. Neste trabalho foram examinados o comportamento mecânico em termos de tensões e deflexões das fibras superiores, bem como ao longo da profundidade das demais camadas, sujeito à aplicação de esforços dinâmicos. Para esse estudo, foi efetuada uma análise tridimensional utilizando o método dos elementos finitos. Considerou-se uma carga gerada pelo eixo padrão rodoviário, variando-se as velocidades (10, 40 e 80 km/h) e a pressão de enchimento dos pneus (0,74 MPa, 0,82 MPa e 0,92 MPa). Como resultado, foi possível observar a redução das tensões e deflexões na superfície do pavimento com o aumento da velocidade e um aumento nas tensões com o aumento da pressão de enchimento do pneu, o que pode ser explicado pela redução do tempo de exposição e da área de contato pneu-pavimento, respectivamente.

*Palavras-chave:* Pavimento asfáltico, Elementos finitos, Pressão de inflação, Velocidade, Análise dinâmica.

**Abstract:** Considering the relevance of asphaltic pavements in Brazil, it is necessary to develop studies with the approach on the efforts under which the pavement is subjected. During this research the mechanical behavior, stress and strains on the top fibers of the asphaltic concrete layers of a flexible pavement, as well as along the depth of the other layers, were evaluated. The study was based on a three-dimensional analysis with finite elements. The standard single axle load was considered under movement, and the speed of 10 km/h, 40 km/h, 80 km/h and tire pressure of 0,74 MPa, 0,82 MPa and 0,92 MPa were considered. The results revealed that the decrease of stresses and deflections on the pavement surface is related with the increasing of the speed. For other hand, an increase on the stresses and deflections was observed with the corresponding increasing of tire pressure. In both cases, the response can be associated with the reduction of the exposure time and contact area between the tire and the pavement, respectively.

*Keywords:* Asphaltic pavement, Finite elements, Tire pressure, Speed, Dynamics.

## 1 Introdução

O pavimento como estrutura, conforme [1] consiste em um sistema combinado de camadas, sujeito a cargas originárias da movimentação do tráfego sobre sua superfície. Em um exame mais detalhado das cargas atuantes sobre o mesmo, a análise de tensões e deformações considera que as forças verticais (correspondentes ao peso do veículo) são transmitidas ao pavimento pelas rodas do veículo. Em condições normais de serviço, como verificado por [2], [3] e [4], a camada de revestimento do pavimento está sujeita a uma sucessão de esforços de compressão e tração conforme a passagem da carga.

A intensidade e o comportamento dessas tensões, por sua vez, são influenciados por diversos fatores dentre os quais podem ser mencionados a intensidade e velocidade de aplicação da carga, inflação do pneu, entre outros. Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo analisar o comportamento e a intensidade das tensões e deflexões verticais a que os pavimentos estão sujeitos, variando velocidade e inflação do pneu.

### 1.1 Velocidade de aplicação da carga

Diversos pesquisadores, dentre eles [5] verificaram em seus estudos que quanto menor a velocidade dos veículos, maior o dano ocasionado ao pavimento, podendo o aumento da velocidade resultar no alívio das deflexões devido ao menor tempo de contato pneu-pavimento.

Afirmações idênticas já haviam sido obtidas por [6] e [7] os quais verificaram que o aumento da duração de aplicação da carga intensifica os deslocamentos e a tensão vertical, a qual constitui na principal causa de ocorrência de rupturas em pavimentos asfálticos sujeitos a tráfego pesado e baixas velocidades dos veículos.

### 1.2 Inflação do pneu

Em 1996, [6] verificaram que ao se reduzir a pressão dos pneus ocorre uma redução significativa nas tensões horizontais na face inferior da camada de concreto asfáltico. O mesmo efeito ocorre na face superior, porém de maneira não tão significativa. Mais tarde, [8] obtiveram conclusões análogas ao avaliar, dentre outros fatores, o efeito da variação da pressão de inflação do pneu sobre o desempenho estrutural de um pavimento flexível. Verificaram que, ao aumentar a pressão de inflação dos pneus, a tensão sobre o pavimento aumenta de maneira proporcional, ou seja, a inflação do pneu está diretamente relacionada à área de contato pneu-pavimento e conseqüentemente tem influência direta nos danos gerados no pavimento.

Por outro lado [9], visando obter o comportamento de pavimentos asfálticos à fadiga, mostraram que a pressão dos pneus teve pouco efeito sobre as tensões e deflexões medidas na superfície do

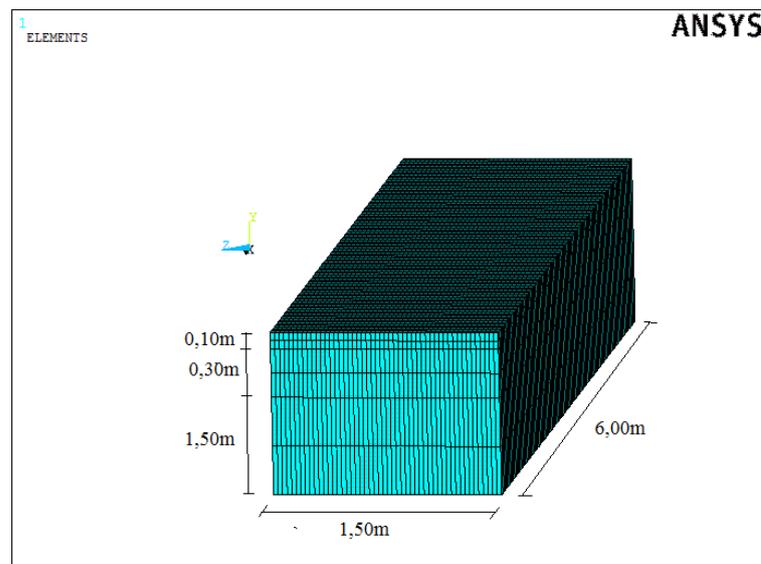
pavimento, sob vários níveis de carga e pressão do pneu, e que o aumento da pressão de enchimento somente tem influência sobre o aumento dos afundamentos e fissuras para seções do pavimento menos espessas e sujeitas a maiores temperaturas.

## 2 Metodologia

Em vista disso, a presente pesquisa consiste em uma análise numérica na verificação do comportamento de diversos fatores sobre a intensidade das tensões e deflexões da camada de revestimento de pavimentos asfálticos. Dentre esses fatores, no presente trabalho são avaliadas a velocidade de aplicação da carga e a inflação do pneu.

Para a análise numérica em questão empregou-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o programa *ANSYS*, em uma análise dinâmica explícita tridimensional no *LS-DYNA*. O pneu foi modelado com o elemento finito retangular do tipo *SHELL163*, um elemento de 4 nós com capacidades de dobra e de membrana, com 12 graus de liberdade em cada nó: translação, acelerações e velocidades nas direções nodais *x*, *y* e *z* e rotações sobre os mesmos eixos, usado apenas em análises dinâmicas explícitas. A estrutura do pavimento foi modelada com o elemento *SOLID164*, elemento finito hexaédrico de oito nós, com os seguintes graus de liberdade: deslocamentos, velocidades e acelerações nodais nas direções *x*, *y* e *z*.

Um modelo simplificado, com aplicação de uma carga pontual sobre o pavimento foi desenvolvido para verificar a convergência dos resultados a partir do refinamento da malha. Para validação do modelo dinâmico, foram utilizados os resultados obtidos a partir do trabalho de [10]. A Fig. 1 apresenta a discretização do domínio e a geometria do modelo.



**Figura 1** – Geometria e discretização do domínio por meio do MEF.

A seção do pavimento considerada nesta análise é composta por três camadas: revestimento asfáltico, uma base de solo granular sobre um subleito de solo natural compactado. Tais dimensões e tipos de camada foram obtidas do estudo de [11] o qual empregou o método de dimensionamento empírico prescrito pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes para um tráfego de projeto equivalente a  $N(8,2t) = 5 \times 10^7$  passadas do Eixo padrão, considerado como tráfego pesado, e um subleito com CBR=10%. As propriedades dos materiais utilizados na análise são apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1** – Dados inseridos no modelo.

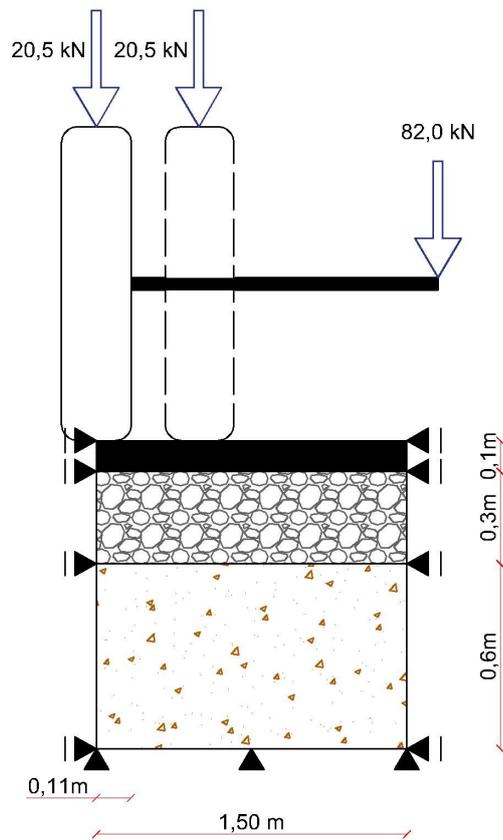
Material	E (MPa)	$\nu$	$\rho(\text{kg/m}^3)$	H (mm)
Revestimento	3000	0,3	2300	100
Base	300	0,35	2000	300
Subleito	60	0,4	2000	1500

Onde E é o Módulo de Elasticidade (ou Resiliente),  $\nu$  o Coeficiente de Poisson,  $\rho$  a massa específica dos materiais das camadas de espessura H. Devido à inexistência de dados em termos do Módulo de Elasticidade fornecidos por [11], visto que este varia com a velocidade e intensidade das cargas aplicadas, a primeira simplificação do modelo consiste na adoção do mesmo Módulo de Elasticidade para todas as velocidades analisadas e valor constante ao longo de cada camada do pavimento.

Para este estudo fez-se ainda, uso de soluções teóricas aproximadas, baseada na hipótese de camadas horizontais finitas de materiais elásticos conforme teoria de Burmister (1945) [11], considerando um modelo elástico-linear, homogêneo e isotrópico.

A origem do sistema está localizada no eixo do pneu, o qual é do tipo radial e modelo 9,00 x 20,00 com dimensões 9” (22,4 cm) de largura nominal da seção transversal e 20” (50,8 cm) de diâmetro nominal do aro, baseado nos estudos de [11]. Os elementos que compõem a geometria do pavimento possuem restrições de deslocamento vertical, na face inferior da camada de subleito, e horizontal nas faces transversais e longitudinal ao sentido de deslocamento dos pneus de modo a simular o confinamento do solo na região no entorno do modelo e para não interferir nos resultados da pesquisa.

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 tf (82 KN), de acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT [12]. Por simplicidade, foi modelada apenas uma das rodas, representativa do eixo traseiro de um caminhão, conforme a Fig. 2, onde o eixo de simetria do problema coincide com o centro da roda.



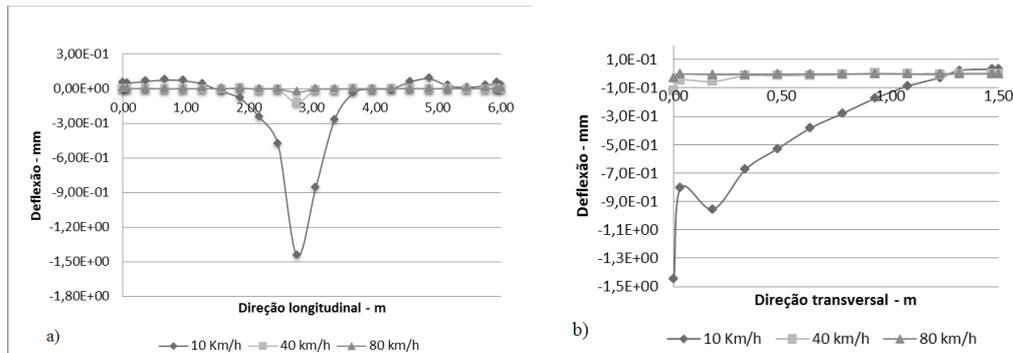
**Figura 2** – Representação da geometria e condições de contorno do problema.

O problema foi descrito em duas fases: a primeira considerou a variação das velocidades de 10 km/h, 40 km/h e 80 km/h e pressão de inflação constante e igual a 0,74 MPa. A segunda considerou uma variação das pressões de 0,74 MPa, 0,82 MPa e 0,92 MPa, para uma mesma velocidade (40 km/h). Os efeitos de tensões e deflexão foram avaliados nas fibras superiores da camada de revestimento a partir do eixo de simetria do problema, considerando as direções longitudinal (direção de rodagem) e transversal. As pressões de inflação 0,74 MPa e 0,82 MPa, empregadas na simulação justificam-se pela pesquisa realizada por [11] que identificou sua predominância na rodovia BR 277, trecho Curitiba Paranaguá/PR. Para coeficientes de atrito, um parâmetro constante e igual a 0,6 foi considerado, assumindo uma rodovia nova, na condição de pavimentos asfálticos secos percorridos por caminhões, conforme [13].

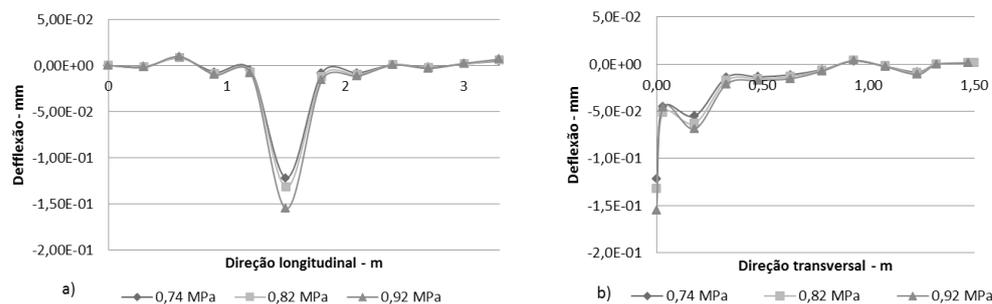
### 3 Resultados

Para efeito de comparação na análise dos valores encontrados, as Fig. 3 e 4 mostram as amplitudes das deflexões longitudinais para as velocidades e pressões consideradas. A análise das tensões e deflexões foi realizada considerando os tempos de  $t = 1,0$  s,  $t = 0,25$  s e  $t = 0,125$  s para as velocidades 10, 40 e 80 km/h, respectivamente.

Observa-se que as deformações ao longo das direções longitudinais são mais acentuadas para velocidades menores, ou seja, quanto maior a velocidade, menor é a deflexão ao longo do pavimento. O contrário ocorre com a pressão do pneu, ou seja, o aumento da pressão implica em um aumento das deformações devido às tensões de compressão no pavimento.



**Figura 3** – Deflexões na superfície do revestimento nas direções a) longitudinal e b) transversal para velocidades 10,40 e 80 km/h e pressão de enchimento de 0,74MPa.



**Figura 4** – Deflexões na superfície do revestimento nas direções a) longitudinal e b) transversal para pressões de enchimento de 0,74 MPa, 0,82MPa e 0,92MPa e velocidade igual a 40 km/h.

Em termos de tensões verticais na superfície do pavimento, as Fig. 5 e 6 apresentam as amplitudes das tensões de compressão para as mesmas considerações de velocidade e pressão. Observa-se que as tensões ao longo das direções longitudinal e transversal são maiores para velocidades menores e maiores para pressões maiores. Ou seja, quanto maior a velocidade, menor o tempo de contato do pneu com o pavimento, menor a tensão e conseqüentemente menor a deflexão. E ainda, quanto maior a pressão do pneu, menor a área de contato, maiores são as tensões e deflexões.

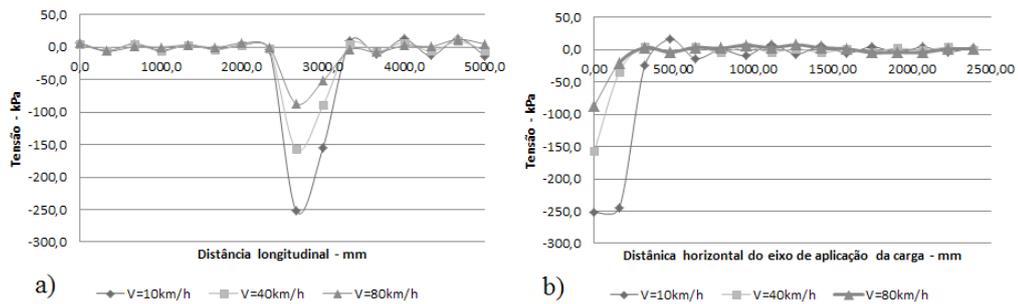


Figura 5 – Tensões verticais na superfície do revestimento nas direções a) longitudinal e b) transversal.

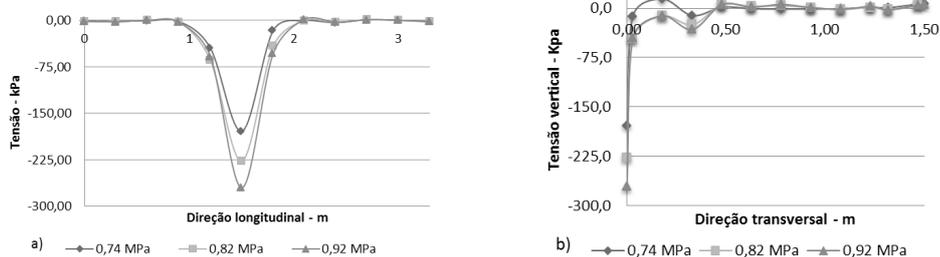


Figura 6 – Tensões verticais na superfície do revestimento nas direções a) longitudinal e b) transversal para pressões de enchimento de 0,74 MPa, 0,82 MPa e 0,92 MPa em 40 km/h.

É possível verificar também, que na direção longitudinal há uma sucessão de esforços de compressão e tração, ou seja, antes e depois do pico de compressão ocorrem pequenos picos de tração, o que não ocorre na direção transversal. A falta de simetria observada na Fig. 5a) indica a direção do movimento (esquerda para a direita).

A Fig. 7 mostra os deslocamentos ao longo das camadas para a situação crítica de velocidade. Percebe-se que as deformações atingem o subleito onde se dissipam. Já a Fig. 8 mostra a amplitude dessas deformações para todas as considerações de velocidade e pressão de inflação do pneu igual a 0,74 MPa.

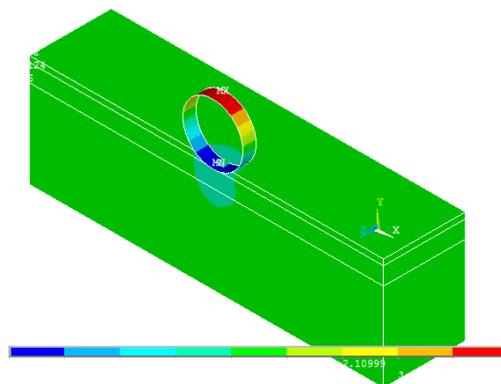
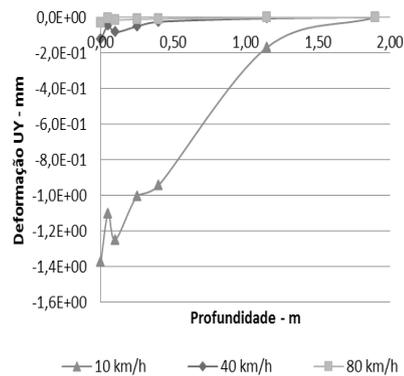


Figura 7 – Deflexões ao longo da estrutura do pavimento para a velocidade crítica de 10 km/h.



**Figura 8** – Amplitude das deformações ao longo das camadas do pavimento para as velocidades 10 km/h, 40 km/h e 80 km/h.

A partir destas análises é evidente perceber que tanto a variação da velocidade como a pressão de inflação dos pneus causam impactos significativos nas tensões resultantes sobre as camadas do pavimento sendo ambas significativas quando da consideração da vida útil dos pavimentos.

## 4 Conclusões

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

Com base neste estudo, foi possível concluir que a velocidade de deslocamento da roda sobre a superfície do pavimento tem um efeito significativo sobre as tensões e deflexões do pavimento asfáltico, sendo benéfica para as velocidades mais altas. No sentido oposto, pressões de inflação menores provocam menores solicitações ao pavimento. Nos estudos considerando os efeitos da velocidade, verificou-se ainda que, para a seção estudada, as tensões ao longo da estrutura do pavimento atingiram o subleito, onde se dissipam.

Apesar da relativa simplicidade do modelo empregado (comportamento elástico linear, isotrópico e homogêneo), o presente trabalho apresentou as análises paramétricas realizadas em modelo dinâmico, válido no âmbito de estudo deste trabalho (mecanicista). No entanto, uma melhor representação do comportamento dos materiais poderá ser obtida, por exemplo, com modelos não-lineares ou com a inclusão da plasticidade ou viscoelasticidade, cujos parâmetros podem ser obtidos a partir de ensaios laboratoriais, em estudos subsequentes.



## Referências

- [1] MEDINA J. DE; MOTTA, L. M. G. DA. **Mecânica dos pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015.
- [2] PERRET, J. **Déformations des couches bitumineuses au passage d'une charge de traffic**. [s.l.] ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2003.
- [3] BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 3ª Reimpressão. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.
- [4] MAHONY, M. J. O. et al. Bearing capacity of forest access roads built on peat soils. **Journal of Terramechanics**, v. 37, p. 127-138, 2000.
- [5] 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, p. 117-125, 2012.
- [6] CHATTI, K., H. B. KIM, K. K. YUN, J. P. MAHONEY, AND C. L. MONISMITH. **Field Investigation into Effects of Vehicle Speed and Tire Pressure on Asphalt Concrete Pavement Strains**. In **Transportation Research Record** 1539, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1996, p. 66-71.
- [7] 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.
- [8] MULUNGYE, R. M.; OWENDE, P. M. O.; MELLON, K. **Finite element modelling of flexible pavements on soft soil subgrades**. *Materials and Design*, v. 28, n. 3, p. 739-756, 2007.
- [9] BONAQUIST, R., R. SURDAHL, W. MOGAWER. **Pavement Testing Facility – Effect of Tire Pressure on Flexible Pavement Response and Performance**. Report FHWA-RD-89-123. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Aug. 1989.
- [10] Saad, B., Mitri, H., and Poorooshab, H. 2005. “**Three-dimensional dynamic analysis of flexible conventional pavement foundation**.” *J. Transp. Eng.*, 1316, p. 460-469.
- [11] 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] 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.
- [12] 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.
- [13] IRURET, 1996 apud ARAGÃO, R. F. **Acidentes de Trânsito Análise da Prova Pericial**. 6. ed. Campinas, SP: 2016.