

O EFEITO DA CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO NO DESEMPENHO DO PAVIMENTO FLEXÍVEL

THE EFFECT OF TRAFFIC CHARACTERIZATION ON THE PERFORMANCE OF FLEXIBLE PAVEMENT

Heliana Barbosa Fontenele¹, José Leomar Fernandes Júnior²

¹Universidade Estadual de Londrina, Departamento de Construção Civil, E-mail: heliana@uel.br

²Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Transportes,
E-mail: leomar@sc.usp.br

RESUMO

A caracterização das cargas do tráfego é de grande importância para o dimensionamento de pavimentos, bem como para a quantificação do desempenho para fins de gerência de pavimentos. Assim, o objetivo desta pesquisa foi analisar os efeitos da caracterização do tráfego sobre o desempenho dos pavimentos, a partir da geração de modelos estatísticos baseados no conceito proposto pelo método empírico-mecanístico da AASHTO, de espectros de carga por eixo dos veículos comerciais de carga, comparando-os com o conceito de equivalência de carga, desenvolvido a partir do AASHTO *Road Test*. Dados de pesagens realizadas no ano de 2008 no Posto de Pesagem de Veículos da SP-160, km 28, pista Sul, foram utilizados para o desenvolvimento dos espectros de carga e posterior modelagem. A comparação entre os resultados previstos pelos modelos e os dados originais, feita tanto pela abordagem empírica como pela empírico-mecanística, com uso dos programas computacionais ELSYM5 e MEPDG, evidenciou o modelo Weibull como o mais indicado para aplicação em rodovias brasileiras com características de tráfego semelhantes às da Rodovia dos Imigrantes.

Palavras-chave: veículos rodoviários, solicitações do tráfego, carga por eixo, espectros de carga, desempenho de pavimentos.

ABSTRACT

The characterization of traffic loads is of great importance for pavement design, as well as for the measurement of performance in a pavement management system. Thus, the objective of this research was to analyze the effects of traffic characteristics on pavement performance through the generation of statistical models based on the concept proposed by the AASHTO mechanistic empirical method, axle load spectra of commercial vehicles, comparing them with the concept of load equivalence factor, developed through the AASHTO *Road Test*. Data collected in 2008 in a weighing station located on Immigrant Highway, SP-160, km 28, southern runway, were used for the development of load spectra and subsequent modeling. The comparison between the results predicted by the models and the original data, made either by empirical and empirical-mechanistic approaches, with use of computer programs ELSYM5 and MEPDG, shows that the Weibull model is the most suitable for application in Brazilian highways with similar traffic characteristics to the Immigrants Highway.

Keywords: road vehicles, traffic load, axle load, axle load spectra, pavement performance.

1 – INTRODUÇÃO

O tráfego de veículos representa um papel muito importante no dimensionamento de estruturas de pavimentos, bem como a representação do seu comportamento ao longo do tempo. No decorrer das últimas décadas muitos estudos têm sido desenvolvidos com o interesse de representar de forma mais próxima à realidade as condições impostas pelo carregamento oriundo dos veículos e os seus reflexos nos pavimentos, para que os projetos e sua posterior análise possam ser desenvolvidos da maneira mais fiel possível à situação vivida em campo.

As pesquisas realizadas sempre reforçaram que a utilização das abordagens empíricas, datadas dos anos 60, vem acompanhada de limitações, onde seus resultados são reproduzíveis somente para as mesmas, ou muito similares características da região do seu desenvolvimento. Nos dias de hoje, em termos de tráfego, as características dos veículos (tipo de eixo, tipo de rodagem, pressão de enchimento dos pneus e tipo de suspensão) e das cargas

são bem diferentes daquelas existentes há 50 anos. Nas últimas décadas a vida remanescente dos pavimentos continuou sendo verificada sob bases empíricas e expressa em termos do número equivalente de solicitações do eixo padrão de 8,2 t, utilizando-se da lei da quarta potência para converter o tráfego misto em cargas equivalentes por eixo.

Como resultado do avanço relacionado às pesquisas destinadas à representação do comportamento das estruturas mediante as solicitações do tráfego, observa-se a tendência na substituição da tradicional base puramente empírica pela empírico-mecanística. Neste quesito um dos métodos mais recentes foi proposto pelo *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) no projeto 1-37 A (NCHRP, 2004), o Método Empírico-Mecanístico da AASHTO (MEPDG – *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide*), que inseriu um novo conceito para caracterização do tráfego: os espectros de carga por eixo (*Axle Load Spectra*).

Para preencher a lacuna existente entre o antigo conceito utilizado na caracterização do tráfego (baseado em cargas equivalentes) e o novo (baseado nos espectros

de carga por eixo) alguns estudos desenvolveram modelos matemáticos para esboçar os dados de tráfego da maneira mais fiel possível ao existente em campo. Assim, os locais que carecem de fontes de dados para uma correta análise de tráfego podem ser beneficiados. Sabe-se que, infelizmente, nem todos os locais dispõem de equipamentos para as devidas coletas de cargas dos veículos rodoviários, ficando então o procedimento relativo ao projeto e ao gerenciamento de pavimentos dependente de aproximações oriundas de informações do volume de tráfego e contagem de eixos.

O objetivo deste trabalho foi analisar os efeitos da caracterização do tráfego sobre o desempenho dos pavimentos a partir da geração de modelos estatísticos com base no conceito de espectros de carga por eixo dos veículos comerciais de carga, comparando-os com o conceito de equivalência de carga.

2 – ESPECTROS DE CARGA POR EIXO

Os espectros de carga por eixo consistem, de acordo com Haider e Harichandran (2007a), de informações de carga por eixo e de suas repetições para várias configurações (eixos simples, tandem duplos e triplos), sendo então usadas para criar distribuições que representam as cargas dos eixos e as variações a elas associadas.

Timm, Bower e Turochy (2006) descreveram que espectros de carga são distribuições de peso por eixo desenvolvidas para cada tipo de eixo, para um determinado fluxo de tráfego. Essas distribuições são utilizadas na modelagem das respostas mecânicas do pavimento necessárias à determinação das funções de deterioração empíricas para prever a vida remanescente do pavimento.

Ao longo dos últimos anos maneiras simplificadas para gerar os espectros de carga por eixo têm sido desenvolvidas. Assim, vários trabalhos como os de Timm, Tisdale e Turochy (2005), Turochy, Baker e Timm (2005), Turochy, Timm e Tisdale (2005), Haider e Harichandran (2007a, 2007b e 2007c), Prozzi e Hong (2007), Sung *et al.* (2008) desenvolveram modelos matemáticos a partir de distribuições de carga por eixo (espectros de carga) para caracterizar o tráfego original, para que posteriormente pudessem ser aplicados diretamente nos modelos mecânicos para calcular as respostas do pavimento sob a ação do carregamento.

Os modelos desenvolvidos se basearam em combinações de distribuições de probabilidade (Lognormal, Normal, Weibull). A partir de métodos estatísticos os parâmetros de tais modelos foram obtidos.

De acordo com Timm, Tisdale e Turochy (2005), a intenção do desenvolvimento de equações matemáticas para modelar o espectro de carga foi a de preencher a lacuna deixada pela carência de fontes de dados, pois nem todos os estados americanos possuem um sistema de aquisição de dados necessários para a montagem do espectro de carga por eixo. Na maioria dos cenários envolvidos no projeto de pavimentos, os espectros de carga com dados específicos do local não são obtidos, pois estão disponíveis somente os dados relativos ao volume de tráfego a partir de contagem de eixos.

3 – EFEITO NO DIMENSIONAMENTO E DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS

A preocupação no desenvolvimento de modelos que representassem a distribuição de cargas por eixo de uma determinada localidade, fez com que se buscasse a geração de padrões que pudessem ser usados com certa confiabilidade para estimar os dados necessários ao dimensionamento e análise de desempenho de pavimentos, visando principalmente auxiliar órgãos que não dispõem de dados do local de interesse.

Dentre esses estudos, verificou-se que na geração dos modelos que representariam o carregamento do tráfego em campo, a preocupação estava muito mais voltada ao ajuste dos dados observados aos estimados que com relação ao efeito no desempenho do pavimento (em alguns casos verificações puramente visuais, outros com base em resultados de testes estatísticos). Portanto, havia pouca ou nenhuma preocupação com o efeito dessa caracterização no desempenho do pavimento. Assim, a precisão da estimativa de dano ao pavimento acabava sendo considerada equivalente à precisão do ajuste dos dados. Prozzi e Hong (2007) afirmaram que isso não é racional, tendo em vista que o dano causado pelas solicitações do tráfego não acontecem de forma linear ao carregamento por eixo.

No estudo conduzido por Turochy, Baker e Timm (2005) foi avaliada a variabilidade temporal e espacial dos espectros de carga por eixo de veículos de carga e seu conseqüente reflexo no dimensionamento dos pavimentos flexíveis e rígidos. Para tanto, duas abordagens foram utilizadas: uma estatística e outra prática.

Os resultados relativos à significância estatística levaram à conclusão que, na maioria, as distribuições apresentaram diferenças temporais e espaciais significativas. Quanto à significância prática, os impactos no dimensionamento de pavimentos rígidos e flexíveis não se apresentaram de forma significativa. Ou seja, as variações temporais e espaciais nos espectros de carga por eixo, observadas pelos autores, não produziram efeitos notáveis sobre a concepção dos pavimentos.

Guo, Prozzi e Tudu (2005) usaram cinco estruturas de pavimentos para avaliar a diferença nas respostas e desempenho dos pavimentos resultantes da aplicação, separadamente, das duas formas de caracterização do tráfego: por meio dos ESAL (*Equivalent Standard Axle Load*) e por meio dos espectros de carga por eixo. Dessa forma puderam avaliar a metodologia de quantificação da carga do tráfego.

Com o estudo eles afirmaram que a seleção do critério de desempenho é que irá demandar o tipo de método de quantificação das cargas do tráfego: para o critério de deformação permanente nas trilhas de rodas a previsão a partir do espectro de cargas sempre é subestimada no formato dos ESAL e para o critério de trincamento a diferença entre os dois formatos dependerá do tipo da estrutura de pavimento.

Com a mesma finalidade de comparar o dimensionamento e o desempenho previsto pelas duas formas de caracterização do tráfego, Carvalho e Schwartz

(2006) desenvolveram um estudo considerando 5 estados dos EUA (Alabama, Arizona, Maryland, Dakota do Sul e Washington) que representavam uma variedade de condições climáticas e de tipo de solo. A partir dos resultados, de acordo com o desempenho previsto pelo programa computacional MEPDG, o Guia da AASTHO 1993 superestima o desempenho a partir da subestimação dos defeitos deformação permanente nas trilhas de rodas e trincas por fadiga nos pavimentos localizados nos locais de temperaturas mais quentes que aquelas do local de realização do *AASHTO Road Test*, bem como para as condições de maior nível de tráfego.

4 – MÉTODO DE PESQUISA

Nesta seção é abordado o método usado ao longo da pesquisa. A partir da coleta de dados, o procedimento experimental foi dividido em três etapas: uma relativa somente ao uso dos dados originais do posto de pesagem, com o desenvolvimento dos espectros de carga, análise empírica e empírico-mecânica dos danos a uma dada estrutura de pavimento; uma segunda etapa relacionada ao desenvolvimento de funções de ajuste aos espectros de carga originais, bem como posterior análise empírica e empírico-mecânica a partir dos espectros ajustados; e uma última etapa com a avaliação dos efeitos previstos no desempenho do pavimento a partir do uso do programa computacional MEPDG.

4.1 Coleta de dados de pesagens

Os dados relativos ao peso bruto total combinado, ao peso por eixo ou conjunto de eixos e ao tipo de veículo rodoviário de carga, registrados em um dos postos de pesagem (PPV) em operação no ano de 2008 no Estado de São Paulo, foram utilizados neste estudo para a montagem dos espectros de carga por eixo e análises posteriores. O PPV fica localizado no km 28 da Rodovia dos Imigrantes (SP-160), pista Sul.

4.2 Desenvolvimento dos espectros de carga

Para cada tipo de eixo (simples de roda simples – ESRS, de rodas duplas – ESRD, *tandem* duplo – ETD e *tandem* triplo – ETT) foi montada uma distribuição anual, tendo no eixo das abscissas a carga observada por eixo e na ordenada a correspondente frequência relativa. É importante ressaltar que nesta pesquisa, diferentemente da maioria dos trabalhos relativos ao tema, os espectros para os eixos simples foram separados entre simples com rodas simples e simples com rodas duplas. O intuito foi de avaliar a influência da rodagem simples (eixos direcionais e eixos com pneus extralargos) sobre o desempenho dos pavimentos, pois tal ação não fica evidenciada no método empírico de dimensionamento em função dos ESRS e ESRD serem considerados em conjunto, em um único gráfico ou tabela, quando da determinação do fator de equivalência de carga (FEC).

Para o desenvolvimento dos espectros de carga por eixo foram seguidos os intervalos de carga estabelecidos

no relatório NCHRP 1-37A (para ESRS e ESRD valores de carga entre 1.360,5 e 18.140,6 kg com intervalos de 453,5 kg, para o ETD valores de carga entre 2.721,1 e 36.281,2 kg a intervalos de 907 kg e para o ETT valores de carga entre 5.442,2 e 46.258,5 kg a intervalos de 1.360,5 kg).

Os espectros de carga por eixo desenvolvidos para todas as classes de veículos podem ser verificados na íntegra em Fontenele (2011).

4.3 FEC, FV e N empírico-mecanísticos

Os fatores que visam expressar os danos nos pavimentos foram obtidos a partir do uso das respostas estruturais críticas do pavimento. Com os fatores de danos, os dados relativos ao volume do tráfego comercial, a proporção dos tipos de eixos e as respostas estruturais, foi determinado o número de solicitações necessárias à ruptura do pavimento (N). Foi adotado VDMA de 10.993 veículos, período de projeto de 20 anos e taxa de crescimento do tráfego de 4% a.a.

Os FEC empírico mecánicos resultaram da análise estrutural do pavimento, cujas características estão apresentadas na Tabela 1, e posterior aplicação da Equação 1.

Tabela 1 – Características do pavimento

Camadas	Espessura (cm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coef. de Poisson
1 (Revestimento)	12,5	4.000	0,3
2 (Base)	20	400	0,4
3 (Sub-base)	25	200	0,4
Subleito	∞	70	0,45

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

Em que:

ρ_i é a resposta estrutural correspondente à solicitação em análise;

ρ_0 é a resposta estrutural à solicitação padrão;

b é o expoente associado à forma de deterioração, à resposta estrutural considerada, ao tipo de ensaio e à estrutura analisada.

As respostas estruturais consideradas foram as deformações horizontais de tração na fibra inferior do revestimento ($\epsilon_{ht, i}$) e as deformações verticais de compressão no topo do subleito ($\epsilon_{vc, m}$). O programa computacional de análises elástico-lineares ELSYM5 foi utilizado para a obtenção dessas respostas.

A distância considerada entre os centros das superfícies de carregamento no ESRD foi de 33 cm, já para os ETD e ETT foi de 120 cm. As respostas estruturais foram determinadas nos centros das superfícies de carregamento e em pontos de equidistância entre elas.

Foram consideradas as pressões de 563 kPa (80 psi) e 844 kPa (120 psi). Tais valores são, respectivamente, a pressão de enchimento dos pneus considerada nos experimentos do AASHTO Road Test e, de acordo com

Fernandes Júnior, Paes e Pereira (2006; 2007), a pressão de enchimento média no Brasil. Para cada pressão foram obtidos os valores de $FEC_{trincas}$ (com uso da $\epsilon_{ht,1}$) e de $FEC_{afundamento}$ (para a $\epsilon_{vc,m}$). Cada valor de fator de equivalência de carga individual (FEC_i) foi calculado a partir do uso da Equação 1, aplicando-se o expoente 3,291 e 4, respectivamente, conforme usado em Fernandes Júnior *et al.* (2002). As respostas estruturais correspondentes à solicitação em análise foram obtidas para as cargas correspondentes aos pontos médios dos intervalos de classe de cargas para simular a aplicação do espectro de carga por eixo.

O valor do FEC para cada carga aplicada foi obtido pela atribuição da correspondente frequência relativa ao FEC_i , sendo que o valor final para o eixo analisado constou da somatória dos 38 valores parciais de ESRS e ESRD e/ou 31 valores parciais de ETT. Assim, obteve-se um fator de equivalência de carga ponderado: “ $FEC_{trincas}$ ” e “ $FEC_{afundamento}$ ”.

A partir dos FEC foram calculados os valores de $FV_{trincas}$ e $FV_{afundamento}$, correspondentes a cada classe considerada neste trabalho, mediante o somatório dos valores de FEC obtidos para cada eixo que compõe o veículo em análise.

O procedimento para o cálculo do “N” empírico-mecânico foi feito aplicando-se os valores correspondentes de FV médios da frota ($FV_{trincas}$ ou $FV_{afundamento}$).

4.4 Desenvolvimento das funções de probabilidade

O espectro de carga para cada tipo de eixo (simples, tandem duplo e triplo) foi modelado a partir da função estatística que melhor se ajustasse aos dados. Assim, neste trabalho foram desenvolvidos modelos de distribuição de carga por eixo usando-se funções Weibull (Equação 2) e Log-normal (Equação 3).

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \quad (2)$$

$$f(x; \mu; \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}} \cdot e^{-[\ln(x) - \mu]^2 / 2\sigma^2}, \quad x \geq 0 \quad (3)$$

Em que:

- μ : média dos dados logaritmicamente transformados;
- σ : desvio padrão dos dados logaritmicamente transformados;
- x : carga do eixo;
- α : parâmetros de forma;
- β : parâmetro de escala.

Foi verificada a função que melhor se adequou à distribuição original a partir dos valores de R^2 , testes de aderência como o qui quadrado (χ^2) e teste *Kolmogorov Smirnov* (*K-S*) e porcentagem de diferença (erros) no valor final de FEC e FV entre os espectros originais e os previstos pelos modelos.

Ressalta-se que do total de onze classes de veículos com frequência superior a 1% foram utilizados na

modelagem os espectros referentes a somente 7 (sete) classes de veículos, pois estas sete classes em conjunto correspondiam a uma porcentagem do tráfego comercial próxima a 90%. As classes de veículos consideradas foram: 2S3; 3D4; 3S3; 2S2; 2C; 2S1 e 3C. As classificações adotadas estão de acordo com DNIT (2007). No referido material são apresentadas, para cada classe de veículo, as silhuetas de configurações básicas ou combinação dos veículos, o número de eixos e as suas correspondentes carga máximas, o PBT máximo com e sem a tolerância.

4.5 O efeito dos espectros teóricos no dimensionamento

A partir dos resultados do programa computacional ELSYM5 o procedimento para cálculo dos fatores de danos e solicitações a partir dos modelos desenvolvidos foi executado da mesma forma como foi realizado com os espectros originais.

Os parâmetros das distribuições foram obtidos a partir do método dos mínimos quadrados, ou seja, os valores que resultaram na menor soma dos quadrados dos desvios entre a distribuição teórica e a original foram os selecionados para o modelo.

Já na etapa em que o programa computacional MEPDG foi usado o objetivo foi determinar o impacto dos espectros de carga modelados no desempenho do pavimento comparando-os com os resultados obtidos com os espectros originais.

Assim os espectros originais e aqueles modelados pelas funções log-normal e weibull dos eixos dos sete tipos de veículos (tanto usando o mesmo tipo de função em todos os eixos como as alternando segundo aquelas de melhor R^2) foram avaliados usando o programa computacional MEPDG. A versão 1.100, a última disponibilizada para teste, foi utilizada neste trabalho.

Conforme o procedimento usado anteriormente o período de projeto considerado foi de 20 anos e o pavimento foi do tipo flexível.

5 – RESULTADOS

Os FEC, os FV e as solicitações foram calculados a partir dos modelos desenvolvidos para cada eixo das 7 classes de veículos consideradas neste trabalho. Uma comparação entre os resultados previstos (provenientes dos modelos) e os resultados originais (provenientes dos dados reais de pesagem no PPV01) foi executada para aumentar a confiabilidade de previsão dos modelos. Assim, os erros percentuais relativos aos FV foram calculados e estão nas Tabelas 2 e 3.

Nota-se que entre os modelos, para uma mesma pressão de enchimento dos pneus, não houve grandes variações nos valores médios da frota.

O modelo Weibull apresentou o menor erro, tanto para $FV_{trincas}$ como $FV_{afundamento}$, portanto os valores de N_{2028} (solicitações acumuladas no 20º ano de projeto: ano de 2028) obtidos por esse modelo são os mais próximos do obtido com os espectros originais. Além disso, também é importante observar que entre as pressões de enchimento

dos pneus de 563 kPa (80 psi) e 844 kPa (120 psi) os $FV_{afundamento}$ apresentam variações praticamente inexpressivas, reforçando que o aumento de pressão nos pneus contribui apenas para o aumento da deterioração trincamento.

Assim, verifica-se que os valores de FV médio da frota ($FV_{trincas}$) com a pressão de 844 kPa (120 psi) diferem em mais de 50% dos obtidos com a pressão de 563 kPa (80 psi). Isso deixa claro que pressões de enchimento dos pneus de 844 kPa (120 psi) são mais danosas ao pavimento.

Tabela 2 – Comparação de FV e “N” entre espectros originais e previstos (pressão de enchimento de pneus de 563 kPa)

Espectro de Carga	FV médio da frota		N_{2028}		% erro FV	
	Trincas	Afundam.	Trincas	Afundam.	Trincas	Afundam.
Original	2,77	3,29	1,59E+08	1,89E+08	-	-
Lognormal	2,90	3,65	1,66 E+08	2,09 E+08	4,7	10,9
Weibull	2,75	3,32	1,58 E+08	1,90 E+08	-0,7	0,9
Lognormal +Weibull	2,79	3,37	1,60 E+08	1,93 E+08	0,7	2,4

Tabela 3 – Comparação de FV e “N” entre espectros originais e previstos (pressão de enchimento de pneus de 844 kPa)

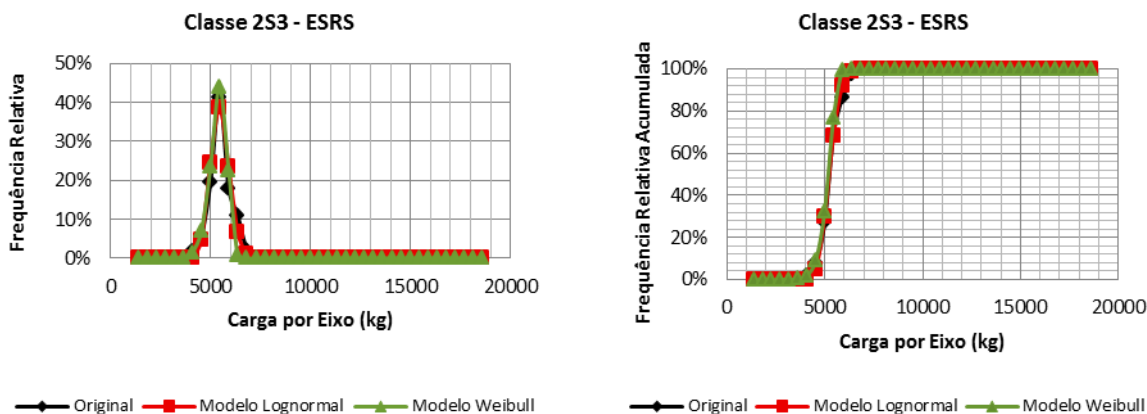
Espectro de Carga	FV médio da frota		N_{2028}		% erro FV	
	Trincas	Afundam.	Trincas	Afundam.	Trincas	Afundam.
Original	4,67	3,37	2,68E+08	1,93E+08	-	-
Lognormal	4,91	3,75	2,82 E+08	2,15 E+08	5,1	11,3
Weibull	4,66	3,41	2,67 E+08	1,95 E+08	-0,2	1,2
Lognormal +Weibull	4,74	3,45	2,72 E+08	1,98 E+08	1,5	2,4

Na Figura 1 são apresentados gráficos com as distribuições originais e as previstas pelos modelos weibull e lognormal para o ESRS do veículo de maior frequência no posto de pesagem. Para o eixo exemplificado, os parâmetros obtidos para os modelos foram: $\mu = 8,56$ e $\sigma = 0,086$ (modelo lognormal) e $\alpha = 15$; $\beta = 5.308$ (modelo

Weibull). Os espectros previstos por ambos modelos para o ESRS do veículo 2S3 apresentaram boa correlação com o espectro original, sendo o valor de R^2 superior a 0,90.

Os parâmetros obtidos para todas as classes de veículos e correspondentes espectros podem ser verificados na íntegra em Fontenele (2011).

Figura 1 – Comparação entre espectro original e previstos



Apesar dos resultados satisfatórios de R^2 e a proximidade das distribuições, como observado no exemplo da Figura 1, os testes estatísticos realizados (K-S e Qui quadrado) foram unânimes em todos os tipos de classes de veículos na rejeição de igualdade entre os espectros gerados pelos modelos desenvolvidos e os espectros originais. Para o teste K-S as rejeições são explicadas pelo grande tamanho das amostras que fizeram com que os valores de $D_{critico}$ fossem muito baixos. O valor máximo tolerado para as diferenças entre os espectros testados foi de cerca de 1,3%.

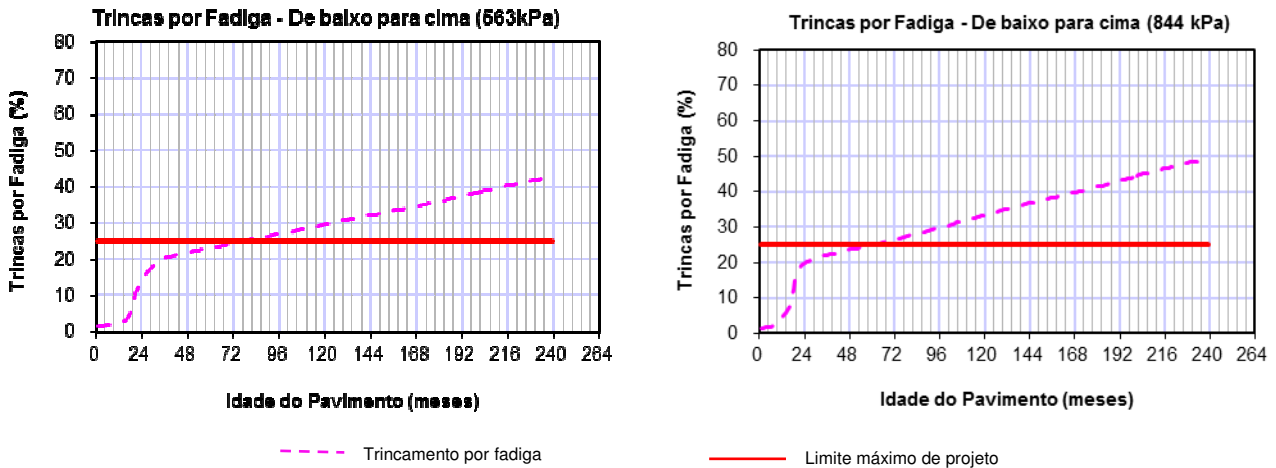
No teste Qui quadrado o número de intervalos com frequência superior ou igual a 5 gerou graus de liberdade baixos e, conseqüentemente, baixos valores $\chi^2_{critico}$. Assim, valores críticos baixos aumentaram a probabilidade de rejeição da hipótese nula a qual sustenta que os dados observados se ajustam à distribuição teórica testada. Além disso, o teste é bastante sensível aos valores nas caudas dos espectros, assim qualquer diferença entre os valores previstos pelo modelo e os valores originais nas caudas ganha maior proporção.

Ainda para verificar o efeito dos modelos desenvolvidos para os espectros de carga por eixo foram desenvolvidas curvas de evolução de deteriorações ao longo do tempo, com o auxílio do programa computacional MEPDG. Na Figura 2 são apresentados, como exemplo, gráficos relativos ao defeito trincas por fadiga. Em tal figura as curvas foram desenvolvidas para os espectros originais com pressões de enchimento dos pneus de 563 kPa e 844 kPa. Nesse caso foi possível verificar o efeito nocivo do aumento de pressão de inflação dos pneus, onde se observou que quando comparado ao uso da pressão de

enchimento dos pneus de 563 kPa, a pressão igual a 844 kPa fez com que a deterioração atingisse o valor limite de projeto em menos tempo. Ou seja, adotando uma pressão de enchimento igual a 563 kPa (80 psi) o pavimento resistirá, aproximadamente, até o 79^o mês, já com o uso de pressão de inflação de 844 kPa (120 psi) sua vida é reduzida para o 60^o mês.

Isso foi observado em todas as deteriorações, tendo efeito mais pronunciado nas trincas por fadiga e afundamentos nas trilhas de rodas.

Figura 2 – Curvas de desempenho para o defeito trincas por fadiga de baixo para cima – espectros originais



Nas Tabelas 4 e 5 estão expostos, de forma resumida, os resultados decorrentes dos diferentes tipos de ajustes no desempenho do pavimento adotado na pesquisa. Assim, é apresentado o mês em que o determinado defeito atinge o limite de projeto de acordo com a pressão de enchimento dos pneus, para cada tipo de defeito e o correspondente modelo de distribuição de probabilidade ajustado.

De forma complementar a tais resultados, na Tabela 6 são apresentados os resultados relativos a todas as formas de deterioração consideradas no programa computacional MEPDG a partir dos erros percentuais, tendo-se como

referência os valores obtidos para as pressões de enchimento de 563 kPa.

Nota-se para cada forma de deterioração que os erros entre os modelos relativos à época em que os limites são atingidos não diferem muito, estando a maior porcentagem de erro relacionada às deformações permanentes nas trilhas de rodas no concreto asfáltico e em seguida o afundamento total.

As últimas colunas das Tabelas 4 a 8 dizem respeito ao Índice de Irregularidade Longitudinal (*International Roughness Index – IRI*).

Tabela 4 – Previsões (em meses) do desempenho dos modelos ajustados considerando a pressão de enchimento de 563 kPa

Espectro	TrincaLong	TrincaFadiga	Afundam.Tot	Afundam.CA	IRI
Original	4,3	79,0	55,0	42,3	188,8
Log-normal	3,6	70	44,2	102,7	180,0
Weibull	4,1	78,0	53,7	104,5	187,3
Lognormal+Weibull	4,0	78,0	53,0	104,0	187,0

Tabela 5 – Previsões (em meses) do desempenho dos modelos ajustados considerando a pressão de enchimento de 844 kPa

Espectro	TrincaLong	TrincaFadiga	Afundam.Tot	Afundam.CA	IRI
Original	3,6	60,0	28,0	105,0	152,0
Log-normal	3,2	55,0	22,0	40,0	142,0
Weibull	3,4	59,0	26,0	41,8	150,9
Lognormal+Weibull	3,4	58,0	25,0	41,7	150,0

Tabela 6 – Erros de previsão (tempo) dos resultados provenientes do uso da pressão de enchimento de 844 kPa em relação aos resultados provenientes do uso da pressão de 563 kPa

Espectro	Trinca _{Longitudinal}	Trinca _{Fadiga}	Afundamento _{Tot}	Afundam. _{CA}	IRI
Original	-17,0%	-24,0%	-49,0%	-59,7%	-19,5%
Lognormal	-11,0%	-21,0%	-50,0%	-61,0%	-21,0%
Weibull	-17,0%	-24,0%	-52,0%	-59,95%	-19,5%
Lognormal+Weibull	-16,0%	-26,0%	-53,0%	-59,9%	-20,0%

Quando comparadas as proximidades das previsões dos modelos desenvolvidos para os espectros de carga por eixo aos valores obtidos para os espectros originais o resultado foi considerado satisfatório para o modelo Weibull, ou seja, a previsão de desempenho gerada a partir do modelo não apresentou diferenças de grande vulto,

sendo responsáveis pelos menores erros. Nas Tabelas 7 e 8 estão listados os erros obtidos entre as previsões (ou seja, os meses em que o limite de determinado critério é atingido), considerando que os meses para este cálculo foram tomados de forma aproximada.

Tabela 7 – Erros nas previsões dos modelos para pressões de enchimento de pneus de 563 kPa, a partir do uso do programa computacional MEPDG

Modelo	Trincas _{Longitudinais}	Trincas _{Fadiga}	Afundamento _{Total}	IRI
Log-normal	-16,0%	-11,0%	-20,0%	-4,7%
Weibull	-4,2%	-1,3%	-2,4%	-0,85%
Lognormal +Weibull	-5,8%	-1,3%	-3,6%	-0,94%

Tabela 8 – Erros nas previsões dos modelos para pressões de enchimento de pneus de 844 kPa, a partir do uso do programa computacional MEPDG

Modelo	Trincas _{Longitudinais}	Trincas _{Fadiga}	Afundamento _{Total}	IRI
Log-normal	-10,3%	-8,0%	-21,0%	-6,6%
Weibull	-4,8%	-1,7%	-7,1%	-1,3%
Lognormal+Weibull	-4,8%	-3,3%	-10,7%	-1,3%

Os valores constantes nas tabelas são todos negativos, o que significa que pelos modelos o momento em que o limite de projeto será atingido ocorrerá antes ao previsto pelo uso dos dados originais. Assim, a partir de uma comparação entre o momento em que se atinge o limite de projeto com os espectros originais e com os espectros Weibull, tem-se que a diferença não é superior a dois meses de antecedência. Diferentemente do que ocorre com os outros modelos. Todas as curvas de desempenho geradas pelo programa computacional MEPDG e utilizadas para no desenvolvimento das Tabelas 4, 5 e 6 podem ser verificados na íntegra em Fontenele (2011).

CONCLUSÕES

A principal conclusão do estudo aqui conduzido, que reflete o alcance do objetivo proposto, é que, a partir dos resultados, ficou evidenciada a possibilidade de desenvolvimento de modelos estatísticos que sejam capazes de caracterizar de forma adequada os espectros de carga por eixo com os dados da região usada na pesquisa, bem como de refletir com pequena margem de erro o desempenho previsto para os dados originais.

Para os dados utilizados os modelos desenvolvidos pela distribuição de probabilidade Weibull forneceram melhores resultados e, portanto, são os mais indicados para aplicação na região de estudo, sustentando tal

afirmação pelos valores dos erros de previsão que não ultrapassaram 2 meses. É importante ressaltar que o fato dos testes estatísticos K-S e Qui quadrado não apresentarem resultados satisfatórios para aderência dos espectros previstos aos originais não significou um resultado definitivamente negativo para a aplicabilidade dos modelos, fato este comprovado pelos testes práticos.

Ao longo dos resultados ficou evidenciado o efeito nocivo à vida dos pavimentos que o aumento da pressão de enchimento dos pneus provoca, pois juntamente com a redução da área de aplicação da carga por eixo há o aumento dos esforços atuantes, principalmente no revestimento asfáltico. Os erros de previsão (relativos à época em que os limites são atingidos) entre os modelos para cada forma de deterioração, tomando-se como referência os valores obtidos para as pressões de enchimento de 563 kPa, não diferiram muito.

As maiores porcentagens de erros nas previsões estão relacionadas às deformações permanentes nas trilhas de rodas em todo o pavimento e também apenas no concreto asfáltico. Logo se conclui, pelos valores obtidos, que a vida prevista do pavimento sofre uma redução, respectivamente, de cerca de 50 a 60%, quando são usadas pressões de enchimento dos pneus de 844 kPa. E com relação às trincas por fadiga, sua vida fica reduzida em 24%.

Para finalizar, a contribuição deste trabalho não se restringe ao meio acadêmico, pois traz, para a área

técnica, uma forma de caracterizar de maneira satisfatória os dados de tráfego, necessários ao projeto de pavimentos e aos sistemas de gerência de pavimentos. Assim, com uso dos modelos estatísticos aqui apresentados os custos das coletas de dados podem ser minimizados, pois a diminuição do período de coleta, por exemplo, não será um item prejudicial. Além disso, os locais que carecem de fontes de dados para análise do pavimento também poderão ser beneficiados.

REFERÊNCIAS

- CARVALHO, R. L.; SCHWARTZ, C. W. Comparisons o flexible pavement designs: AASHTO empirical vs. NCHRP 1-37A mechanistic-empirical. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. n. 1947, p. 167-174. Washington, DC, 2006.
- FERNANDES JÚNIOR, J. L.; FABBRI, G. T. P.; PARREIRA, A. B.; SÓRIA, M. H. A.; GIGANTE, A. C. Efeito dos pneus Trelleborg sobre pavimentos asfálticos. **Revista Minerva: Pesquisa e Tecnologia**, n. 2, v. 1, p. 13-24, São Carlos, 2002.
- FERNANDES JÚNIOR, J. L.; PAES, J. C.; PEREIRA, P. A. A. Avaliação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos flexíveis portugueses e brasileiros. **Revista Pavimentação**, Ano II, n. 5, p. 28-38. Associação Brasileira de Pavimentação – ABPv, Rio de Janeiro, 2007.
- FERNANDES JÚNIOR, J. L.; PAES, J. C.; PEREIRA, P. A. A. Effects of traffic loading on Portuguese and Brazilian pavements performance. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2006 Annual Meeting CD-ROM. Washington, DC, 2006.
- FONTENELE, H. B. **Representação do tráfego de veículos rodoviários de carga através de espectros de carga por eixo e seu efeito no desempenho dos pavimentos**. 2011. 287 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- GUO, R; PROZZI, J. A.; TUDTUD, F. Effect on pavement performance of characterizing traffic loading by means of ESALs and Axle load spectra. **Proceedings of the International Innovation Forum for Doctoral Students in Transportation Engineering**, p. 156-173, Shangai, 2005.
- HAIDER, S. W.; HARICHANDRAN, R. S. Characterizing axle load spectra by using gross vehicle weights and truck traffic volumes. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2007 Annual Meeting CD-ROM. Washington, DC, 2007a.
- HAIDER, S. W.; HARICHANDRAN, R. S. Quantifying the effects of truck weights on axle load spectra of single and tandem axle configurations. **Proceedings of the Fifth Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control**, p. 73-78. Park City, Utah, 2007b.
- HAIDER, S. W.; HARICHANDRAN, R. S. Relating axle load spectra to truck gross vehicle weights and volumes. **Journal of Transportation Engineering**, v. 133, issue 12, p. 696-705. American Society of Civil Engineers, 2007c. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2007\)133:12\(696\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:12(696)).
- NCHRP – NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures**. Final Report NCHRP 1-37 A. Champaign, Illinois, 2004.
- PROZZI, J. A.; HONG, F. Optimum statistical characterization of axle load spectra based on load-associated pavement damage. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 8, issue 4, p. 323-330, Taylor & Francis Group, 2007. <http://dx.doi.org/10.1080/10298430600949902>.
- SUNG, Y.; HUANG, W.; WANG, K.; LIN, J. Axle load distribution model for heavy vehicles on Sun Yat-Sen freeway in Taiwan. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Annual Meeting CD-ROM, paper 08-2372. Washington, DC, 2008.
- TIMM, D. H.; BOWER, J. M.; TUROCHY, R. E. Effect of load spectra on mechanistic-empirical flexible pavement design. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2006 Annual Meeting CD-ROM. Washington, DC, 2006.
- TIMM, D. H.; TISDALE, S. M.; TUROCHY, R. E. Axle Load Spectra Characterization by Mixed Distribution Modeling. **Journal of Transportation Engineering**, v. 131, issue 2, p. 83-88. American Society of Civil Engineers, 2005. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2005\)131:2\(83\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:2(83)).
- TUROCHY, R. E.; BAKER, S. M.; TIMM, D. H.; Spatial and temporal variations in axle load spectra and impacts on pavement design. **Journal of Transportation Engineering**, v. 131, issue 10, p. 802-808. American Society of Civil Engineers, 2005. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2005\)131:10\(802\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:10(802)).
- TUROCHY, R. E.; TIMM, D. H.; TISDALE, S. M. **Truck Equivalency Factors, Load Spectra Modeling and Effects on Pavement Design**. Highway Research Center, Final Report – Project 930-564. Auburn, Alabama, 2005.