

SENSIBILIDADE DE MÉTODOS EMPÍRICO MECANÍSTICOS PARA ANÁLISE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

SENSITIVITY OF MECHANISTIC-EMPIRICAL METHODS FOR ANALYSIS OF FLEXIBLE PAVEMENTS

Thaís Ferrari Réus¹, Heliana Barbosa Fontenele²

¹Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, PR
E-mail: thaissferrari@uel.br

²Doutora em Ciências, Área de Infraestrutura de Transportes, Professora adjunta da Universidade Estadual de Londrina, Departamento de Construção Civil, Londrina, PR. E-mail: heliana@uel.br.

RESUMO

No método Empírico Mecanístico (E-M) de dimensionamento de pavimentos flexíveis, a estrutura inicial adotada deve ser verificada quanto aos critérios de desempenho e alterada caso esses não sejam atendidos. Assim, a análise de sensibilidade pode auxiliar a entender quais alterações podem ser feitas. O objetivo deste trabalho é comparar a sensibilidade do método de dimensionamento E-M da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), com aplicação do programa computacional do *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG), e do programa computacional ELSYM5 quanto às variações das espessuras e módulos de resiliência das camadas de pavimentos flexíveis. Para tanto, foram realizadas simulações nos programas para estimar o desempenho de pavimentos. Os resultados obtidos foram ajustados por modelos de regressão e os coeficientes de regressão foram utilizados para determinar os parâmetros significativos na previsão de desempenho e para comparar os métodos aplicados quanto à sensibilidade. Os defeitos previstos pelo programa computacional do MEPDG foram sensíveis a, pelo menos, um dos parâmetros em análise, enquanto que o desempenho previsto pelo programa computacional ELSYM5 foi sensível às variações nas espessuras do revestimento e da sub-base e no módulo de resiliência do subleito. Concluiu-se que existem diferenças quanto a sensibilidade observada nos dois programas computacionais, porém, percebeu-se que o ELSYM5 é uma alternativa viável para a aplicação de um método E-M de dimensionamento.

Palavras-chave: Análise de sensibilidade, Métodos empírico mecanísticos, Programa Computacional do MEPDG, Programa computacional ELSYM5.

ABSTRACT

The Mechanistic Empirical (E-M) method of design the initial structure adopted for the pavement should be checked for performance criteria and changed if they are not met. In this context, the sensitivity analysis may help to understand that changes can be made. Thus, this study aims to compare the sensitivity of E-M AASHTO, applying the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) software, and the software ELSYM5 for variation in thickness and resilient modulus of flexible pavement layers. Therefore, simulations were performed on software to estimate the pavement performance. The results were adjusted by regression models and regression coefficients were used to determine the significant parameters in predicting performance and to compare applied methods as sensitivity. Distress estimated by the MEPDG software were sensitive to at least one of the parameters under consideration, while the performance predicted by the computer program ELSYM5 was sensitive to variations in the thickness of the asphalt layer and the sub-base and the subgrade resilient modulus. It was concluded that there are differences in sensitivity observed in both softwares, however, the ELSYM5 is a viable alternative to the use as an E-M method of design.

Keywords: Sensitivity analysis, Mechanistic empirical method, MEPDG software, Software ELSYM5.

1 – INTRODUÇÃO

A realidade de campo e projeto tem sido aproximada pela utilização de métodos empírico mecanísticos (E-M) de dimensionamento de pavimentos flexíveis. Esses métodos requerem modelos matemáticos que tem a solução por algoritmos computacionais, que demandam uma série de dados de entrada e podem gerar uma gama de respostas, podendo incluir a combinação de vários parâmetros para uma solução analítica ou para o cálculo interativo de um dado de saída (OROBIO, 2010).

A análise de pavimentos flexíveis nos métodos E-M parte de uma estrutura pré-dimensionada para a qual são determinadas as respostas estruturais e calculados os danos

acumulados durante a vida útil de projeto. Em seguida, com os resultados obtidos nas simulações, se verifica o atendimento dos critérios de projeto pela estrutura, caso estes não sejam atingidos são realizadas variações nessa estrutura e o método é repetido, até que a condição estabelecida seja alcançada.

Assim, percebe-se que o conhecimento dos efeitos proporcionados por cada parâmetro na previsão dos defeitos, permitirá ao projetista variar diretamente a propriedade necessária à solução do problema apresentado na análise.

Diante do exposto, este trabalho pretende comparar a sensibilidade do método E-M da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), a

partir do programa computacional do *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG), com a sensibilidade verificada pelo uso do programa computacional ELSYM5, quanto à variação das espessuras e dos módulos de resiliência das camadas do pavimento em análise.

2 – MÉTODO EMPÍRICO MECANÍSTICO DA AASHTO

O método E-M proposto pela AASHTO, desenvolvido pelo *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) no projeto 1-37 A, compreende uma mudança completa da conceituação acerca do dimensionamento de pavimentos, pois incorporou uma análise mecânica para a avaliação estrutural, oriunda da calibração de modelos teóricos com dados experimentais de campo e laboratório.

A AASHTO propôs no projeto o método de dimensionamento denominado *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG), para dimensionamento de estruturas de pavimentos novos e rehabilitados, e o programa computacional de teste chamado de *MEPDG software*, posteriormente lançado comercialmente como *AASHTOWare® Pavement Desing ME*.

O programa computacional do MEPDG necessita de um alto nível de conhecimento das propriedades fundamentais dos materiais sobre diversas condições de carregamento e clima (AHAMMED *et al.*; 2011).

Os dados de entrada requeridos no método E-M da AASHTO podem ser categorizados em três níveis hierárquicos: o nível 1 se refere ao nível de maior precisão, cujos dados são obtidos por meio de ensaios laboratoriais e de campo, especificamente para o local de projeto; o nível 2 é intermediário, para o qual os parâmetros são obtidos por meio de correlações, com a utilização de equações de regressão empíricas, podendo ser regionais; o nível 3 refere-se ao menor nível de precisão dos dados, sendo adotados valores padrões do programa ou caso os dados sejam obtidos a partir de uma média global ou até mesmo a partir da experiência (AASHTO, 2008).

No que concerne ao tráfego são requeridos dados de entrada relativos ao ano base (ano de abertura da pista ao tráfego), como o volume diário médio anual e o período de projeto; fatores de ajuste do tráfego que incluem, por exemplo, a distribuição por classes de veículos; distribuição horária de veículos e a taxa de crescimento anual do tráfego; e outros dados gerais, tais como a configuração e distância entre os eixos e a pressão enchimento e as características dos pneus (AASHTO, 2008).

A caracterização da estrutura do pavimento é feita por meio da entrada de dados referentes às espessuras das camadas e de seus materiais constituintes. Por exemplo, para a camada de concreto asfáltico é necessário que sejam informados o teor de ligante, o volume de vazios, o peso total unitário, a condutividade térmica e a capacidade de aquecimento (AASHTO, 2008).

Outros dados de entrada requeridos são relativos ao clima regional, que incluem: temperatura horária;

precipitação; velocidade do vento; umidade relativa e a cobertura por nuvens (AASHTO, 2008).

Além desses dados, devem ser informados os critérios de desempenho para a avaliação do pavimento, em que no método E-M da AASHTO são considerados: irregularidade longitudinal inicial; irregularidade longitudinal final; trincas longitudinais do tipo *top-down*; trincas por fadiga do tipo *bottom-up*; trincas transversais térmicas; afundamentos nas trilhas de roda apenas no revestimento asfáltico e acumuladas em todo pavimento (AASHTO, 2008; NCHRP, 2004).

3 – ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

A estrutura adotada inicialmente no projeto de pavimentos, pelo método E-M, deve ser alterada para que se atendam os critérios de desempenho. Devido a esta premissa do método, estudos têm verificado a influência da variação dos parâmetros de projeto na previsão de defeitos, a fim de fornecer um *know-how* aos projetistas para a tomada de decisão.

A sensibilidade da previsão dos defeitos pelo programa computacional do MEPDG perante as variações das espessuras das camadas do pavimento foi verificada por Pelisson *et al.* (2015). Os resultados apresentados pelos autores mostraram que com o aumento da espessura do revestimento asfáltico há uma redução em todos os defeitos, sendo que o maior impacto ocorre nas trincas por fadiga. A variação da espessura da base acarretou uma redução considerável apenas nas trincas por fadiga, já nas deformações permanentes e no Índice de Irregularidade Longitudinal (*International Roughness Index – IRI*) demonstraram pouca sensibilidade. Quanto à variação das espessuras da sub-base os defeitos se mostraram pouco ou não sensíveis.

A variação da espessura do revestimento asfáltico também foi estudada por Vidotto e Fontenele (2013). O programa computacional ELSYM5 foi utilizado para o cálculo das respostas estruturais. A partir das respostas estruturais os autores determinaram os Fatores de Equivalência de Cargas (FEC) empírico mecânicos, obtidos por meio da Equação 1, utilizada neste trabalho e apresentada no método. A partir da somatória dos valores do FEC para cada eixo que compõem os veículos em análise, foram determinados os Fatores de Veículo (FV). Os valores médios de $FV_{trincas}$ e $FV_{deformação}$ foram aplicados na equação de obtenção do número equivalente de solicitações do eixo padrão, obtendo assim o número equivalente de solicitações ao eixo padrão (N) empírico mecânico para trincas e para as deformações. Os autores concluíram que os dois defeitos são sensíveis aos dados analisados.

A variação dos módulos de resiliência das camadas foi estudada por Alexandre *et al.* (2015), que também utilizaram o programa computacional ELSYM5 para a determinação das respostas estruturais do pavimento. De acordo com os resultados, concluíram que com a variação do módulo de resiliência da base, a deformação responsável pelo surgimento das trincas por fadiga é mais

sensível que àquela relacionada aos afundamentos nas trilhas de rodas, havendo aumento da deterioração com o aumento do parâmetro. Com relação à camada de sub-base, verificaram que existe uma baixa sensibilidade à variação do módulo de resiliência. Já para o subleito, a sensibilidade foi considerada muito baixa para as trincas, porém expressiva para os afundamentos nas trilhas de roda.

A sensibilidade da previsão de defeitos pelo programa computacional do MEPDG quanto as variações das propriedades dos materiais granulares (espessura da camada, módulo de resiliência, índice de plasticidade, limite de liquidez, etc.), constituintes da base e do subleito de um pavimento foi estudada por Li *et al.* (2012). O módulo de resiliência da base e do subleito e a espessura da base são as propriedades que apresentaram maior influência na previsão de desempenho em todos os critérios, independente do volume de tráfego. O Coeficiente de Poisson da base e do subleito também apresentaram sensibilidade.

Ainda segundo os autores, as trincas longitudinais (*top-down*) é o parâmetro de desempenho mais sensível às variações das propriedades dos materiais granulares, enquanto que as trincas por fadiga (*bottom-up*) e os afundamentos nas trilhas de rodas se mostraram insensíveis às variações dessas propriedades.

A influência das propriedades dos materiais no desempenho previsto pelo MEPDG também foi objeto de estudo de Orobio e Zaniewski (2011) e (2012). Para a pesquisa utilizaram um pavimento composto por três camadas de concreto asfáltico, uma quarta camada composta por uma base permeável tratada com betume e o subleito. A previsão das trincas foi sensível para as variações do coeficiente de Poisson das quatro primeiras camadas, do índice de vazios das três primeiras, do teor de ligante da primeira camada, da terceira e da quarta e do módulo de resiliência do subleito.

Com relação aos afundamentos nas trilhas de roda, observaram sensibilidade quanto às variações: dos coeficientes de Poisson, do índice de vazios e dos teores de ligante das duas primeiras camadas; do índice de vazios da quarta camada e do módulo de resiliência do subleito.

Em relação à previsão do IRI houve sensibilidade quanta as variações: dos coeficientes de Poisson, do índice de vazios e do teor de ligante das três primeiras camadas; do teor de ligante da quarta camada e do módulo de resiliência do subleito.

Além das propriedades dos materiais, o tráfego também exerce papel fundamental na previsão de desempenho, conforme apresentado por Orobio e Zaniewski (2013). O estudo realizado englobou a sensibilidade dos resultados do MEPDG quanto às variações dos dados de entrada do tráfego. Os autores constataram que o IRI, os afundamentos e as trincas do

tipo *bottom-up* são mais sensíveis: ao VDMA; ao espaçamento entre os pneus duplos e à taxa de crescimento do tráfego. Apesar destes parâmetros não serem controlados pelos projetistas, os resultados da pesquisa mostraram que devem ser cuidadosamente avaliados.

A influência da pressão de enchimento dos pneus foi verificada por Fontenele e Fernandes Júnior (2014). O aumento da pressão dos pneus de 563 kPa para 844 kPa reduziu de 50 a 60% a vida prevista do pavimento, com relação aos afundamentos nas trilhas de roda, e em 24%, tratando-se das trincas por fadiga, de acordo com os valores previstos no MEPDG.

4 – METODOLOGIA DA PESQUISA

Nesta seção aborda-se o método utilizado no desenvolvimento da pesquisa. A partir da definição das condições gerais de análise utilizadas na pesquisa, o procedimento experimental foi dividido em três etapas: a primeira foi referente às análises pelo método E-M da AASHTO, utilizando o programa computacional do MEPDG; a segunda etapa consistiu na análise das estruturas do pavimento no programa computacional ELSYM5; a terceira e última etapa consistiu na análise da sensibilidade da previsão de desempenho perante os parâmetros de entrada para cada um dos programas computacionais utilizados.

4.1 Condições gerais de análise

A análise de sensibilidade do método E-M da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), a partir do programa computacional do MEPDG (versão 1.100), com a sensibilidade verificada pelo uso do programa computacional ELSYM5 foi realizada de forma local, ou seja, com a variação de um parâmetro por vez, mantendo os outros constantes.

Os parâmetros de projetos escolhidos para a análise foram às espessuras das camadas de revestimento asfáltico, de base e de sub-base e os módulos de resiliência das camadas de base, sub-base e subleito. Os defeitos foram estimados para o vigésimo ano de projeto, considerando uma pressão de enchimento dos pneus de 844 KPa (120 psi).

A estrutura do pavimento de referência adotada para este estudo foi a mesma utilizada por Fontenele (2011) e Fontenele e Fernandes Júnior (2014), e as espessuras e módulos de resiliência escolhidos para a análise de sensibilidade partiram da observação de valores típicos utilizados em pavimentos brasileiros.

Na Tabela 1 são apresentados os dados da estrutura do pavimento de referência, bem como os valores utilizados na análise de sensibilidade.

Tabela 1 – Dados da estrutura do pavimento de referência e variações para análise de sensibilidade

Camada	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (MPa)
1	7,50; 10,00; 12,50*; 15,00	4.000
2	15,00; 17,50; 20,0*; 22,50	276; 345; 400*; 483
3	20,00; 22,50; 25,00*; 27,50	186; 197; 206*; 217
Subleito	∞	48; 59; 70*; 79

Nota: *Dados da estrutura do pavimento de referência

4.2 Análises pelo método da E-M da AASHTO

No programa computacional do MEPDG (versão 1.100) foi realizada a previsão de defeitos considerando os seguintes critérios de desempenho pré-estabelecidos: Índice de Irregularidade longitudinal (IRI) inicial igual a 1,0 m/km; Índice de Irregularidade longitudinal final de 4 m/km; Trincas longitudinais *top-down* igual a 189 m/km; Trincas por fadiga classe 3, *bottom-up*, igual a 25 %; Trincas transversais térmicas igual a 189 m/km; Afundamento nas trilhas de rodas no revestimento asfáltico de 6,35 mm; Afundamento nas trilhas de rodas no pavimento todo igual a 19,5 mm. O nível de confiança para a análise dos critérios de desempenho foi de 90%.

Os defeitos previstos pelo programa computacional e considerados neste trabalho foram: trincas longitudinais (*top-down*), trincas por fadiga (*bottom-up*), deformação permanente no revestimento asfáltico, no subleito e total e IRI.

Os dados de entrada relativos aos materiais, ao tráfego e ao clima foram extraídos de Fontenele (2011) e Fontenele e Fernandes Júnior (2014). Para os dados dos materiais das camadas foi utilizado o nível hierárquico 3, enquanto que para os dados do tráfego utilizou-se o nível 1, uma vez que os espectros de carga elaborados pelos autores consideraram dados locais.

4.3 Análises com o programa computacional ELSYM5

O programa computacional ELSYM5 permite o cálculo de tensões e deformações em pavimentos flexíveis. Neste trabalho abordou-se a deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico e deformação vertical de compressão no topo do subleito, atribuídas, respectivamente, ao surgimento das trincas por fadiga e aos afundamentos nas trilhas de roda.

Os dados de tráfego utilizados para as simulações no programa computacional ELSYM5 foram referentes aos espectros de carga desenvolvidos por Fontenele (2011). Porém, os valores de cargas inseridos no referido programa computacional, foram em relação à média dos intervalos de cargas considerados na construção dos espectros de carga, a fim de se simular a aplicação deste em função da carga por eixo.

As deformações foram determinadas nos centros das superfícies de carregamento e em pontos equidistantes a elas. A distância entre os centros das superfícies de carregamento foi de 33 cm para o eixo simples de rodas duplas e de 120 cm para os eixos tandem duplo e triplo.

A partir das deformações máximas calculadas determinou-se o Fator de Equivalência de Carga (FEC) empírico mecanístico relativo às trincas, considerando a deformação máxima de tração na fibra inferior do

revestimento asfáltico, e o relativo às deformações permanentes, considerando a deformação máxima de compressão no topo do subleito. Para tanto utilizou-se a Equação 1, aplicando-se o expoente 3,291 e 4, respectivamente, conforme usado em Fernandes Júnior *et al.* (2002) e Fontenele e Fernandes Júnior (2014).

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

Em que:

ρ_i = Resposta estrutural correspondente à solicitação em análise;

ρ_0 = Resposta estrutural correspondente à solicitação do eixo padrão;

b = 3,921 para trincas e 4,0 para deformação.

Os valores dos FEC foram obtidos para cada ponto médio do intervalo de carga de cada classe de veículo, atribuindo-lhes os valores da frequência relativa correspondente. Foi feito o somatório dos FEC para cada eixo por veículo analisado, para se obter os fatores de equivalência de carga ponderados para as trincas e para a deformação permanente: $FEC_{trincas}$ e $FEC_{deformação}$.

Com o somatório dos FEC de cada eixo que compõe os veículos analisados, se obteve o Fator de Veículo (FV) empírico mecanístico para cada veículo analisado. Em seguida, com a aplicação da frequência relativa à classe dos veículos e o somatório dos FV individuais, obteve-se o $FV_{trincas}$ e o $FV_{deformação}$ médios para a frota circulante na via.

Por fim, foi calculado o número empírico mecanístico de solicitações do eixo padrão (N) para o vigésimo ano de projeto, relativo às trincas ($N_{trincas}$) por fadiga e as deformações permanentes no topo do subleito ($N_{deformação}$).

4.4 Análises de sensibilidade dos métodos empírico mecanísticos (E-M)

As previsões de magnitudes de defeitos, obtidas com as simulações no MPEDG ou do desempenho do pavimento em análise com o programa computacional ELSYM5, foram ajustados por modelos de regressão linear múltipla, em que a previsão de desempenho foi considerada como variável dependente e os parâmetros de projeto em estudo como as variáveis independentes. A partir da inspeção dos coeficientes de regressão (CR) foram determinados os parâmetros significativos para a previsão de cada defeito analisado.

Tanto os modelos de regressão quanto os coeficientes de regressão foram submetidos a testes de hipóteses para avaliar sua significância, considerando um intervalo de confiança de 95%.

Para a hierarquização dos parâmetros, de maior e menor influência, utilizou-se a padronização das variáveis dependentes e independentes dos modelos de regressão. Desta forma, foram obtidos os coeficientes de regressão padronizados (CRP). Essa padronização permitiu a comparação direta da sensibilidade do defeito quanto à variação dos parâmetros de entrada.

5 – RESULTADOS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das simulações nos programas computacionais do MEPDG e ELSYM5, perante as variações nas propriedades das camadas em estudo.

5.1 Sensibilidade do método E-M da AASHTO

Os defeitos obtidos nas simulações no programa computacional do MEPDG (versão 1.100), para o vigésimo ano de projeto, foram ajustados por modelos de regressão múltipla, em que todos esses modelos foram considerados significativos na análise estatística utilizada.

Os valores dos CR calculados, bem como os p-valores oriundos do teste estatístico para esses coeficientes, são apresentados na Tabela 2.

Considerando o intervalo de confiança da análise estatística e o nível de significância utilizado para a avaliação dos parâmetros que foi de 5%, todos os coeficientes de regressão que apresentaram p-valor menor que 5%, se rejeitou a hipótese nula, ou seja, o parâmetro foi considerado significativo.

Em relação às trincas longitudinais pode-se observar que a espessura do revestimento asfáltico e da base e os módulos de resiliência da base e do subleito foram

significativos, sendo que com o aumento dos três primeiros parâmetros o referido defeito diminuiu.

Para as trincas por fadiga a espessura do revestimento asfáltico e da base e o módulo de resiliência da base causaram variações significativas em sua previsão. Todos os parâmetros significativos para as trincas por fadiga apresentaram valores de CR negativo e inversamente proporcionais ao parâmetro de projeto em análise.

Para as deformações permanentes no revestimento asfáltico, apenas a espessura dessa camada apresentou-se significativa e inversamente proporcional à variação desse parâmetro, enquanto todos os outros valores de CR foram aproximadamente iguais à zero.

Já para as deformações permanentes no subleito foram significativos: a espessura do revestimento asfáltico, da base e da sub-base; o módulo de resiliência da base e do subleito. Tratando-se da deformação permanente total do pavimento foram significativas as variações na espessura do revestimento asfáltico e nos módulos de resiliência da base e do subleito, apresentando CR negativo.

Por fim, para o IRI também foi constatada uma relação inversamente proporcional entre o defeito e os parâmetros significativos, como a espessura do revestimento asfáltico e os módulos de resiliência da base e do subleito.

Os valores dos CR foram indicadores da importância dos parâmetros para o surgimento do defeito. Porém para a classificação desses parâmetros de acordo com sua influência foram utilizados os valores dos CRP, considerando seu valor absoluto.

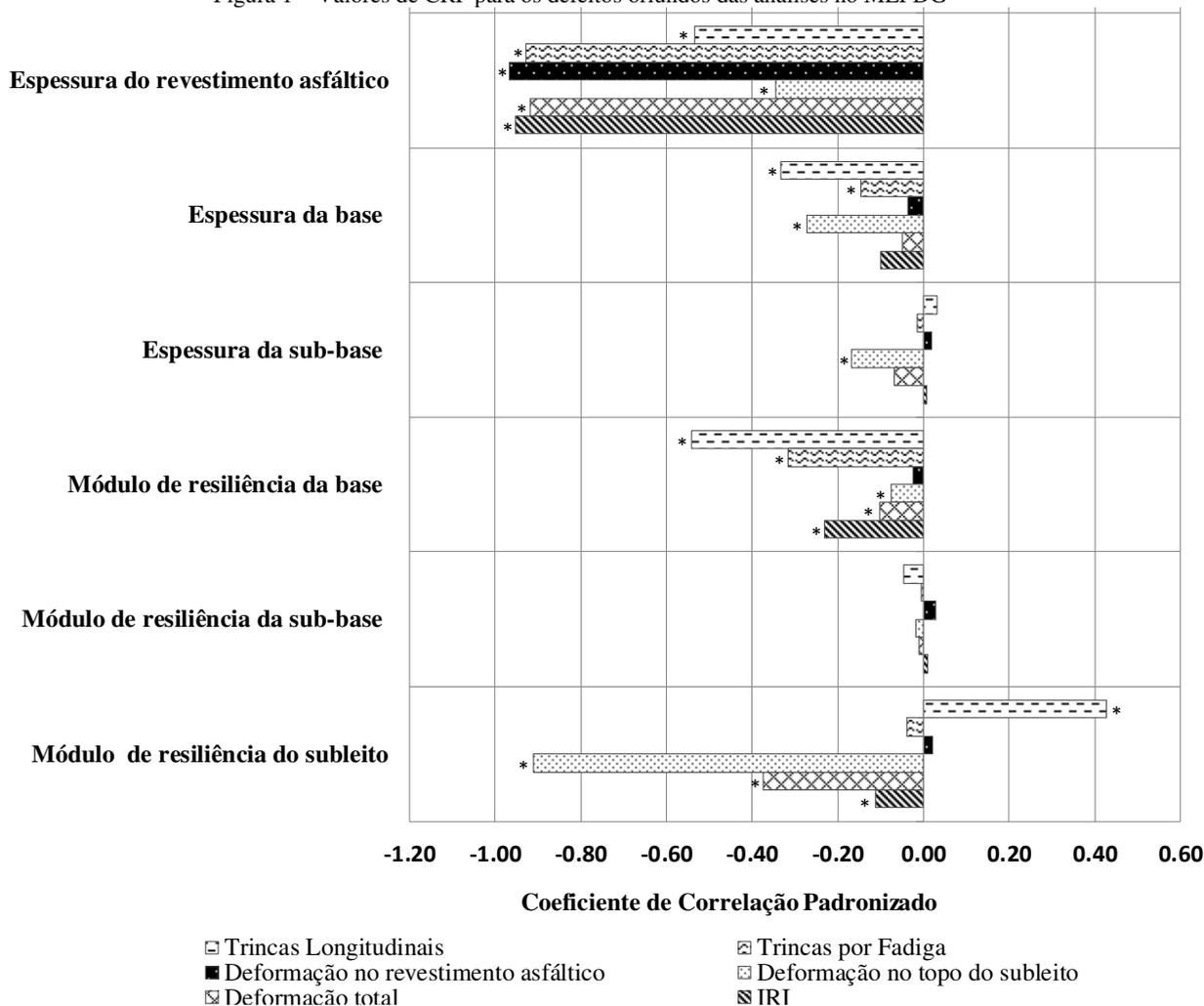
Os valores dos CRP obtidos para os modelos de regressão utilizados são apresentados na Figura 1.

Tabela 2 – Coeficientes de regressão e p-valores para os defeitos previstos no MEPDG

Defeito		Espessura revestimento asfáltico	Espessura base	Espessura sub-base	Módulo da base	Módulo da sub-base	Módulo do subleito
Trincas longitudinais	CR	-144,586	-89,186	8,548	-5,595	-2,691	27,052
	p-valor	<0,0001*	0,0010*	0,7116	<0,0001*	0,5963	<0,0001*
Trincas por fadiga	CR	-6,726	-1,059	-0,113	-0,087	0,006	-0,066
	p-valor	<0,0001*	0,0084*	0,7550	<0,0001*	0,9385	0,4388
Deformação no revestimento asfáltico	CR	-0,777	0,030	0,016	-0,001	0,005	0,004
	p-valor	<0,0001*	0,5307	0,7326	0,6909	0,6243	0,7027
Deformação no topo do subleito	CR	-0,220	-0,173	-0,106	-0,002	-0,002	-0,136
	p-valor	<0,0001*	<0,0001*	<0,0001*	<0,0047*	0,4767	<0,0001*
Deformação total	CR	-1,554	-0,081	-0,114	-0,007	-0,004	-0,149
	p-valor	<0,0001*	0,3311	0,1760	0,0471*	0,8396	<0,0001*
IRI	CR	-0,180	-0,019	0,001	-0,002	0,0005	-0,005
	p-valor	<0,0001*	0,0574	0,8936	0,0002*	0,8337	0,0350*

Nota: *Valores significativos.

Figura 1 – Valores de CRP para os defeitos oriundos das análises no MEPDG



Nota: *Valores significativos

A variação da espessura do revestimento asfáltico foi significativa para a previsão de todos os defeitos mencionados. Pode-se hierarquizar os defeitos em ordem decrescente de sensibilidade como: deformação permanente no revestimento; IRI; trincas por fadiga; deformação total; trincas longitudinais e deformação permanente no topo do subleito.

Com relação às alterações na espessura da base, os defeitos que apresentaram sensibilidade significativa, em ordem decrescente, foram: trincas longitudinais; deformação permanente no topo do subleito e trincas por fadiga. Essa sensibilidade obedece à ordem inversa de proporcionalidade, ou seja, com o aumento dos valores desse parâmetro as magnitudes dos defeitos diminuiram. A deformação permanente no revestimento asfáltico, a total e o IRI não foram afetados significativamente pelo aumento da espessura da base.

O único defeito que se mostrou significativamente sensível às variações na espessura da sub-base foi a deformação permanente no topo do subleito, em que com o aumento da espessura da sub-base as magnitudes previstas para esse defeito diminuiram.

No que concernem às variações dos módulos de resiliência, a maior interferência na previsão dos valores

dos defeitos pelo MEPDG foi devido às alterações nos valores do módulo resiliência da camada de base. Este parâmetro apresentou-se significativo para a previsão, em ordem de maior para menor influência, dos defeitos: trincas longitudinais; trincas por fadiga; IRI; deformação permanente no total e deformação permanente no topo do subleito.

Em relação ao módulo de resiliência da sub-base não foi observada sensibilidade significativa de nenhum defeito. Enquanto que as variações do módulo do subleito influenciam significativamente a previsão das magnitudes das deformações permanentes no topo do subleito, seguida pelas trincas longitudinais, pelas deformações permanente totais e pelo IRI. Os defeitos citados diminuem com o aumento do referido parâmetro, exceto as trincas longitudinais, cuja previsão aumenta.

O aumento da previsão das trincas longitudinais com o aumento do módulo de resiliência do subleito também foi verificado por Shahji (2006). Porém, esperava-se que houvesse a redução desse defeito, uma vez que, conceitualmente, um subleito mais rígido ajudaria a reduzir as tensões e deformações no pavimento e, conseqüentemente, as trincas no revestimento. Esse fato pode estar associado a algum erro nos modelos de

desempenho utilizados na rotina de cálculo no MEPDG, assim como sugere Shahji (2006), ou também pode ser atribuído a diferenças estatísticas, devido aos ajustes e calibrações dos modelos utilizados pelo programa.

5.2 Sensibilidade do programa computacional ELSYM5

A partir das deformações máximas calculadas com o ELSYM5 foram determinados o N_{trinca} e o $N_{deformação}$, conforme já descrito. Esses modelos de regressão foram considerados significativos num intervalo de confiança de 95%. Na Tabela 3 são apresentados os coeficientes de regressão desses modelos, bem como os p-valores da análise estatística para esses coeficientes.

Tabela 3 – Coeficientes de regressão e p-valores para os defeitos previstos a partir do programa computacional ELSYM5

Defeito		Espessura do revestimento asfáltico	Espessura da base	Espessura da sub-base	Módulo de resiliência da base	Módulo de resiliência da sub-base	Módulo de resiliência do subleito
N_{trinca}	CR	-2,24E+07	2,01E+06	-1,24E+07	1,06E+05	8,86E+04	-7,83E+04
	p-valor	<0,0001*	0,4330	0,0001*	0,2814	0,8976	0,8954
$N_{deformação}$	CR	2,85E+06	2,37E+06	-6,29E+07	3,75E+04	1,32E+04	-5,38E+06
	p-valor	0,7497	0,7914	<0,0001*	0,91266	0,99567	0,01862*

Nota: *Valores significativos.

Para as trincas por fadiga percebeu-se que com o aumento da espessura do revestimento asfáltico, da espessura da sub-base e do módulo de resiliência do subleito, a vida útil prevista para o pavimento aumenta, pois, os valores dos CR apresentam sinal negativo. Em contrapartida, para a espessura da base, para os módulos de resiliência da base e da sub-base, os valores dos CR são positivos, indicando que há uma redução da vida útil do pavimento com a adoção de valores maiores para esses parâmetros.

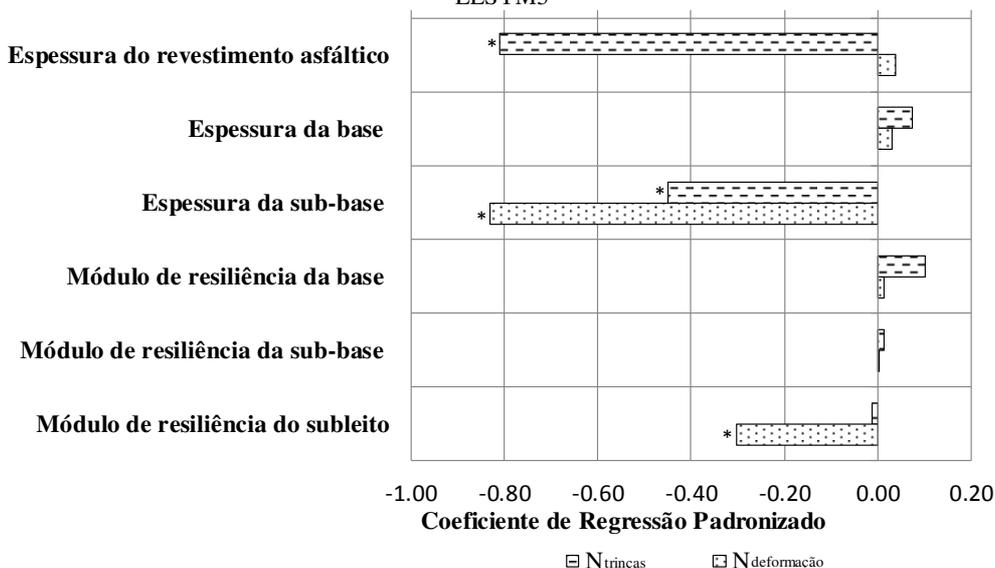
De acordo com os p-valores calculados para cada coeficiente de regressão, constatou-se que apenas a espessura do revestimento e a espessura da sub-base são significativas para a previsão da vida útil do pavimento quanto às trincas por fadiga. Fato justificado pelos p-valores menores que o nível de significância de 5%.

Quanto a deformação permanente as espessuras do revestimento asfáltico e da base e os módulos de resiliência da base e sub-base, apresentaram valores de CR positivo, ou seja, com o aumento desses parâmetros o $N_{deformação}$ previsto também aumenta. Já o acréscimo nos valores da espessura da sub-base e do módulo de resiliência do subleito provoca redução do $N_{deformação}$ previsto para o pavimento.

A análise estatística realizada para os parâmetros analisados mostrou que o defeito é significativamente sensível apenas para a espessura da sub-base e para o módulo de resiliência do subleito, uma vez que são os únicos valores de CR que apresentam p-valor menor que 5%.

A hierarquização dos parâmetros quanto à influência da vida útil foi realizada com o cálculo dos valores dos CRP, que são apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Valores dos CRP para a determinação da vida útil do pavimento de acordo com as análises no programa computacional ELSYM5



Nota: *Valores significativos.

Conforme apresentado na Figura 2, a sensibilidade da previsão da vida útil do pavimento é significativa para as variações na espessura do revestimento asfáltico e da sub-base e as variações do módulo de resiliência do subleito.

Pode-se observar que a espessura do revestimento asfáltico afeta significativamente apenas a previsão quanto às trincas por fadiga, que com o aumento da espessura o N_{trinca} diminuiu, enquanto que as variações na espessura da sub-base foram significativas para ambos os defeitos, em ordem inversa de proporcionalidade – com o aumento da espessura da sub-base o N_{trinca} e o $N_{deformação}$ diminuem, em que é mais influente para as deformações permanentes do que para as trincas.

A previsão da vida útil do pavimento quanto às deformações permanentes também foi significativamente sensível a variações do módulo de resiliência do subleito. Com o aumento desse parâmetro obteve-se a redução do $N_{deformação}$.

Em contrapartida, a previsão da vida útil do pavimento quanto às trincas e as deformações não mostraram alterações significativas perante as variações das espessuras da base, dos módulos de resiliência da base e da sub-base.

5.3 Comparação entre a sensibilidade dos métodos analisados

Ao comparar a sensibilidade do MEPDG e do programa computacional ELSYM5 pode-se notar que, para ambos os programas, os parâmetros significativos são inversamente proporcionais aos indicadores de desempenho: número N no caso do programa computacional ELSYM5 e à estimativa das magnitudes dos defeitos no programa computacional do MEPDG. Ou seja, com o aumento dos parâmetros em estudo as tensões e deformações no pavimento diminuem e consequentemente, as magnitudes dos defeitos previstos e o número N também decrescem.

Com relação à sensibilidade das trincas por fadiga verificou-se que para o programa computacional ELSYM5 apenas foram significativas às espessuras do revestimento asfáltico e da sub-base, enquanto que o método de cálculo do programa computacional do MEPDG apresenta a espessura do revestimento asfáltico e a da base e o módulo de resiliência da base como significativos.

Quanto às deformações permanentes o programa computacional ELSYM5 apresenta sensibilidade apenas perante as variações da espessura da sub-base e do módulo de resiliência do subleito. Enquanto que, se for considerado para o programa computacional do MEPDG apenas as deformações no topo do subleito, tem-se que além desses parâmetros, as espessuras do revestimento asfáltico e da base também são significativas para a previsão da intensidade desse defeito.

Porém, para as simulações com o programa computacional ELSYM5, considerou-se que a deformação permanente total do pavimento seria igual àquela que ocorre no topo do subleito, sendo assim, faz-se necessária a comparação com as deformações totais calculadas com o programa computacional do MEPDG. Nesse contexto, há a disparidade entre os resultados, uma vez que o programa

computacional ELSYM5 apresenta sensibilidade a dois parâmetros significativos: a espessura da sub-base e o módulo de resiliência do subleito. Enquanto que o programa computacional do MEPDG apenas a espessura do revestimento asfáltico.

CONCLUSÕES

O entendimento do comportamento das variáveis de saída perante alterações nas variáveis de entrada é de suma importância para a melhor compreensão do método utilizado, bem como pode auxiliar a identificar as variáveis de maior impacto na solução, fornecendo subsídios a projetistas para a aplicação de novos materiais e para a tomada de decisão.

A partir das simulações no programa computacional do MEPDG concluiu-se que apenas o módulo de resiliência da sub-base não influi significativamente na previsão de nenhum dos defeitos para o caso em estudo. Todos os outros parâmetros foram influentes em pelo menos um defeito.

Da análise de sensibilidade realizada para a situação de estudo, com utilização do programa computacional ELSYM5, foi possível concluir que o desempenho previsto para o pavimento flexível é significativamente sensível para as variações das espessuras do revestimento, espessuras da sub-base e do módulo de resiliência do subleito. Os outros parâmetros não foram considerados significativos.

Ao comparar os dois métodos pode-se verificar que existem diferenças quanto à sensibilidade dos defeitos perante os parâmetros de entrada analisados. A mudança nas variáveis significativas, bem como na sensibilidade dos defeitos podem ser relacionadas ao número de dados de entrada considerados em cada método. O método E-M da AASHTO considera um maior número de dados de entrada para a previsão dos defeitos e também utiliza o módulo de elasticidade dinâmico para a mistura asfáltica, enquanto que no ELSYM5 o número de variáveis de entrada é reduzido e também o módulo de resiliência para o revestimento foi aproximado.

Além disso, a consideração do tráfego também pode ter tido influência determinante nas diferenças quanto a sensibilidade observada nos programas. A simulação dos espectros de carga no programa computacional ELSYM5 foi feita por um método aproximado, considerado coerente no decorrer do trabalho.

A consideração do clima pelo método E-M da AASHTO, também pode ter sido preponderante para as diferenças encontradas.

Apesar das diferenças de sensibilidade constatadas entre a aplicação dos dois programas computacionais, o programa ELSYM5, por se tratar de um programa computacional de domínio público, se mostrou uma alternativa viável para a aplicação de um método de dimensionamento empírico mecanístico de dimensionamento de pavimentos.

Com a aplicação da análise de sensibilidade, pode-se perceber que pequenas variações nos parâmetros estudados podem acarretar mudanças percentuais significativas nos

defeitos previstos pelos métodos estudados. Porém, ainda são necessários estudos mais aprofundados, que levem em consideração outras combinações de tráfego, clima, propriedades dos materiais etc., bem como a análise de sensibilidade fatorial, a fim de entender melhor a inter-relação das variáveis independentes nos modelos de previsão de desempenho.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Araucária pelo auxílio financeiro à pesquisa (Chamada 14/2011 – Protocolo n. 24685) e ao CNPQ pela bolsa concedida.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS EXECUTIVE COMMITTEE – AASHTO. **Mechanistic-Empirical Pavement Design. Mechanistic-empirical pavement design guide: A manual of practice**. Interim Ed. 2008.
- AHAMMED, M. A.; KASS, S.; HILDERMAN, S.; TANG, W. K. S. MEPDG Implementation-Manitoba Experience. **Conference and exhibition of the transportation association of Canada. Transportation successes: let's build on them. Congress et Exhibition de l'Association des Transports du Canada. Les Succes en Transports: Une Tremplin vers l'Avenir**. 2011.
- ALEXANDRE, L. H. C.; ALVES, S. A. M.; BORBA, P. C. S.; RÉUS, T. F.; TEIXEIRA, R.; SILVA JÚNIOR, C. A. P.; FONTENELE, H. B. Sensibilidade dos pavimentos flexíveis às variações dos módulos de elasticidade. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 7, n. 1, p. 71-78, 2015.
- FERNANDES JÚNIOR, J. L.; FABBRI, G. T. P.; PARREIRA, A. B.; ALBA SÓRIA, M. H.; GIGANTE, A. C. Efeitos dos pneus trelleborg sobre pavimentos asfálticos. **Minerva**, v. 2, n. 1, p. 13-24, 2002.
- 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 em Engenharia de Transportes), Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.
- FONTENELE, H. B.; FERNANDES JÚNIOR, J. L. O efeito da caracterização do tráfego no desempenho do pavimento flexível. **Ciência & Engenharia**, v. 23, n. 1, p. 09-16, 2014.
- LI, R.; SCHWARTZ, C. W.; KIM, S.; CEYLAN, H. Local sensitivity of mechanistic-empirical flexible pavement performance predictions to unbound material property inputs. **Proceedings, Geo Congress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering**, 2012. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784412121.154>.
- NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM – **NCHRP 1-37A:2004**. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Report. Transportation Research Board, 2004.
- OROBIO, A.; ZANIEWSKI, J. Sampling-based sensitivity analysis of the mechanistic-empirical pavement design guide applied to material inputs. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2226, p. 85-93, 2011.
- OROBIO, A.; ZANIEWSKI, J. P. Using the mechanistic-empirical pavement design guide for material selection. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia**, n. 64, p. 138-149, 2012.
- OROBIO, A.; ZANIEWSKI, J. P. Sensitivity of the mechanistic-empirical pavement design guide to traffic inputs: a space-filling approach. **Road Materials and Pavement Design**, v. 14, n. 3, p. 735-746, 2013. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2013.816248>.
- PELISSON, N. D.; FERNANDES JÚNIOR, J. L.; SILVA JÚNIOR, C. A. P.; FONTENELE, H. B. Avaliação de desempenho pelo MEPDG: o efeito da variação de espessuras de pavimentos flexíveis. **Journal of Transport Literature**, v. 9, n. 1, p. 20-24, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/2238-1031.jtl.v9n1a4>.
- SHAJHI, S. **Sensitivity analysis of AASHTO's 2002 flexible and rigid pavement design methods**. 2006. Master of Science (Department of Civil & Environmental Engineering), College of Engineering and Computer Science, University of Central Florida. Orlando, Florida, 2006.
- VIDOTTO, J. P.; FONTENELE, H. B. Efeito da variação da espessura do revestimento nas respostas estruturais do pavimento flexível. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 34, n. 2, p. 155-166, 2013. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0375.2013v34n2p155>.