

MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS OBTIDOS A PARTIR DE ANÁLISE DO BANCO DE DADOS DO LTPP-FHWA

Deise Menezes Nascimento
José Leomar Fernandes Júnior

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO

Os modelos de previsão de desempenho de pavimentos são importantes ferramentas utilizadas pelos sistemas de gerência, essenciais para o planejamento das atividades de manutenção e reabilitação, assim como para a estimativa dos recursos necessários para a preservação das rodovias. Este trabalho tem por objetivo comparar o desempenho de seções de pavimentos rodoviários, obtido a partir da base de dados dos experimentos LTPP (*Long-Term Pavement Performance*) do FHWA (*Federal Highway Administration*), com o comportamento previsto pelos modelos de desempenho desenvolvidos por Queiroz (1981), Paterson (1987), Marcon (1996) e Yshiba (2003), além dos modelos contidos no programa HDM-4. A análise do comportamento das seções LTPP é feita utilizando-se uma programação fatorial que, através da análise de variância (ANOVA), permite a determinação do nível de significância de fatores pré-selecionados (tráfego, idade e número estrutural corrigido) bem como a modelagem do desempenho dos pavimentos dessas seções (irregularidade longitudinal e deformação permanente).

ABSTRACT

The pavement performance prediction models are important tools used for pavement management, essential for the planning of maintenance and rehabilitation activities, as well as for budgeting. The research is based on the comparison of the real performance of pavement of sections, obtained from the data base of the LTPP Program (*Long-Term Pavement Performance*) of FHWA (*Federal Highway Administration*), with the behavior predicted by deterioration models developed by Queiroz (1981), Paterson (1987), Marcon (1996) and Yshiba (2003), including models used by program HDM-4. The analysis of the behavior of the LTPP test sections is made through a factorial programming. Analysis of Variance (ANOVA) allows the determination of the level of significance of pre-selected factors (traffic, age and pavement structure) and the development of performance prediction models (roughness and rutting).

1. INTRODUÇÃO

A gerência de pavimentos é um processo que abrange todas as atividades envolvidas com o propósito de fornecer e manter pavimentos em um nível adequado de serviço. Envolve desde a obtenção inicial de informações para o planejamento e elaboração de orçamento até a monitorização periódica do pavimento em serviço, passando pelo projeto e construção do pavimento e sua manutenção e reabilitação ao longo do tempo, conforme apresentado em Haas et al. (1994).

As atividades de gerência de pavimentos e os componentes do sistema estão caracterizados, geralmente, em dois níveis administrativos: gerência em nível de rede e em nível de projeto. A gerência de pavimentos em nível de rede trabalha com informações resumidas, relacionadas a toda malha viária, utilizadas para a tomada de decisões essencialmente administrativas (planejamento, programação e orçamento). Já a gerência de pavimentos em nível de projeto envolve o dimensionamento, a construção, a manutenção e a reabilitação, utilizando informações técnicas detalhadas, relacionadas às seções específicas dos pavimentos.

Os modelos de previsão de desempenho são utilizados em ambos os níveis (rede e projeto) para avaliar a condição dos pavimentos e determinar as ações de manutenção e reabilitação necessárias. Possibilitam, assim, que o SGP forneça um método sistemático e consistente para selecionar necessidades e prioridades de manutenção e reabilitação e determinar o momento ótimo das intervenções, através da previsão da condição futura do pavimento.

Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre modelos de previsão de desempenho desenvolvidos por análises empíricas e empírico-mecanísticas, que predizem a evolução da condição de pavimentos flexíveis, ao longo do tempo e/ou tráfego acumulado. Os modelos de previsão de desempenho analisados foram desenvolvidos por Queiroz (1981), Paterson (1987), Marcon (1996) e Yshiba (2003), sendo considerados, também, os modelos de deterioração utilizados pelo programa de gerência de pavimentos HDM-4. A pesquisa está baseada na comparação do desempenho real de seções de pavimentos rodoviários, obtido a partir da base de dados dos experimentos LTPP (*Long-Term Pavement Performance*) do FHWA (*Federal Highway Administration*), com o comportamento previsto pelos modelos de desempenho analisados.

A análise do comportamento das seções de teste LTPP-FHWA é feita utilizando-se uma programação fatorial que, através da análise de variância (ANOVA), permite a determinação do nível de significância de fatores pré-selecionados (variáveis independentes: tráfego, idade e número estrutural corrigido) bem como a modelagem do desempenho dos pavimentos dessas seções (variáveis dependentes: irregularidade longitudinal e deformação permanente).

2. MODELOS DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS

Os modelos de previsão de desempenho são utilizados pelos Sistemas de Gerência de Pavimentos como ferramenta de auxílio na tomada de decisões, como por exemplo, para a escolha de ações de manutenção e reabilitação, para a determinação da data de intervenção e para a seleção de projetos prioritários. Os modelos de desempenho estimam a evolução da condição do pavimento ao longo do tempo, considerando geralmente fatores como idade, tráfego, clima e número estrutural.

As ações de manutenção e reabilitação envolvem o uso de uma quantia considerável de recursos financeiros, que é gasta periodicamente com a conservação dos pavimentos rodoviários. Para se utilizar com eficiência esses recursos é necessário estimar as condições ou o nível de serventia futuro de diferentes trechos de pavimentos de uma rede viária, o que destaca a importância de modelos de previsão de desempenho confiáveis.

Os modelos de desempenho devem retratar, da melhor forma possível, as condições locais, uma vez que cada região apresenta características distintas como tráfego, clima, capacidade de suporte do subleito, tipo de materiais empregados na construção, além de diferentes técnicas e controles construtivos. Portanto, a decisão sobre qual modelo de previsão que será utilizado pode definir o sucesso das atividades desenvolvidas pelo SGP.

O grau de acurácia necessário para um modelo de previsão de desempenho depende da função na qual ele será empregado. Por exemplo, modelos de desempenho utilizados em análises em nível de projeto necessitam maior acurácia do que aqueles que serão empregados em análises em nível de rede (Shahin, 1994).

Para melhorar o processo de tomada de decisão em gerência de pavimentos, muitas pesquisas foram desenvolvidas para formulação de modelos de desempenho, com destaque para a Pesquisa sobre o Inter-relacionamento dos Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias (PICR), desenvolvida pela Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT), entre 1975 e 1981. Como resultado da PICR, podem ser citados os modelos de previsão de desempenho desenvolvidos por Queiroz (1981) e Paterson (1987).

Nos Estados Unidos, no início da década de 80, o *Transportation Research Board* (TRB), do *Federal Highway Administration* (FHWA), com a cooperação da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), iniciou um estudo denominado *Strategic Transportation Research Study* (STRS), sobre a deterioração do sistema de infraestrutura de rodovias e pontes. Esse estudo foi publicado em 1984 e recomendava a pesquisa em seis áreas estratégicas, destacando-se como uma dessas áreas o programa *Long-Term Pavement Performance* (LTPP).

O programa LTPP foi iniciado em 1987, como parte do *Strategic Highway Research Program* (SHRP), sendo que a responsabilidade pela gerência do programa foi transferida para o FHWA em 1992. Compreende a monitorização de seções de pavimentos em serviço por 20 anos, com a avaliação de mais de 2.400 seções de pavimentos flexíveis e rígidos, constituindo a maior pesquisa sobre desempenho de pavimentos, estando ainda em desenvolvimento.

De acordo com Elkins et al.(2003), o programa LTPP-FHWA visa suprir a necessidade de informações sobre o comportamento dos pavimentos rodoviários, sendo que as análises realizadas têm como objetivos principais: determinar modelos de previsão de desempenho para utilização nos projetos e na gerência de pavimentos; analisar os efeitos específicos sobre os pavimentos das ações do tráfego, do meio ambiente, dos tipos de materiais, da qualidade da construção e das práticas de manutenção; desenvolver novas técnicas de projeto, construção e reabilitação de pavimentos.

No Brasil, a implementação do primeiro Sistema de Gerência de Pavimentos ocorreu no início da década de 80, pelo DNER, para a malha rodoviária federal. Desde então, vários estudos foram publicados no país abordando a gerência de pavimentos. No que diz respeito aos modelos de desempenho, destacam-se os trabalhos de Marcon (1996) e Yshiba (2003).

Marcon (1996) estabeleceu modelos de previsão de desempenho com base nos dados da rede rodoviária do Estado de Santa Catarina, Brasil, levantados em 1990. O desempenho dos pavimentos foi avaliado através de variáveis como quociente de irregularidade, deflexões máximas médias, índice de gravidade global, trincamento total e profundidade média das trilhas de roda.

Yshiba (2003) desenvolveu modelos estatísticos que representam os efeitos dos fatores idade, tráfego e número estrutural sobre o desempenho de pavimentos quantificados em termos da irregularidade longitudinal e das deflexões. Para o desenvolvimento dos modelos foram estabelecidas equações de regressão tendo por base dados históricos de avaliações, realizadas em 1995 e 1998, da condição da malha rodoviária do Estado do Paraná, Brasil.

Os Sistemas de Gerência de Pavimentos contam com programas computacionais para a realização de suas análises. Pode-se citar, como exemplo, o HDM-4 (*Highway Development*

and Management), desenvolvido pelo Banco Mundial, que utiliza modelos de desempenho para avaliar técnica e economicamente projetos de rodovias, preparar programas de investimentos rodoviários e analisar diversas alternativas de manutenção e reabilitação, além de ser utilizado pelo Banco Mundial para a análise de concessão de financiamentos a organismos rodoviários.

3. BANCO DE DADOS LTPP-FHWA

O programa LTPP (*Long-Term Pavement Performance*) do FHWA (*Federal Highway Administration*) visa suprir a necessidade de informações sobre o comportamento dos pavimentos rodoviários (flexíveis e rígidos), por meio da monitorização de seções de pavimentos em serviço, por um período de 20 anos. A pesquisa LTPP-FHWA foi concebida como um programa abrangente destinado a fornecer todas as informações possíveis no que diz respeito a pavimentos, com base na obtenção de dados de alta qualidade.

As seções de teste do banco de dados LTPP-FHWA são classificadas como GPS ou SPS, sendo que a diferença fundamental entre essas duas classificações provém do início do programa LTPP, no qual as seções de teste GPS representam os pavimentos em serviço (como construídos ou após um recapeamento), cujos materiais e projetos estruturais refletem as práticas padrões nos Estados Unidos e no Canadá. As seções de teste SPS representam os pavimentos construídos, conservados e restaurados em condições e localização controlada, para a obtenção de um banco de dados mais completo e para a análise detalhada do desempenho de fatores específicos, necessários para complementar as pesquisas GPS.

As seções de teste analisadas neste estudo são as classificadas como GPS-1 e GPS-2, que apresentam revestimento asfáltico sobre base granular e sobre base estabilizada, respectivamente, compondo os tipos de estrutura mais freqüentemente encontrados no Brasil. Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado o banco de dados do LTPP-FHWA (*LTPP DataPave Online*), que se encontra disponível na página do FHWA (*Federal Highway Administration*) na Internet.

Para a utilização do banco de dados LTPP-FHWA foi estabelecido o seguinte critério: as seções deveriam apresentar clima semelhante ao de grande parte do território brasileiro, isto é, com índice de congelamento entre 0 e 100 e precipitação média anual entre 1000 e 1800 mm. Devido ao pequeno número de seções que atenderam a estes critérios não foram feitas distinções entre as seções novas e as reabilitadas. Essas seções localizam-se na região sul dos Estados Unidos, nos estados do Alabama, Arkansas, Florida e Mississippi.

Nesta pesquisa foram desenvolvidos modelos estatísticos para a previsão da irregularidade longitudinal da superfície dos pavimentos e para a previsão da deformação permanente nas trilhas de roda. Esses modelos são baseados em séries históricas de dados (banco de dados LTPP-FHWA), que são arrançados em matrizes fatoriais visando à identificação dos fatores e interações que têm efeito significativo sobre os parâmetros de desempenho analisados e o estabelecimento de equações de regressão por meio da análise de variância (ANOVA).

O planejamento fatorial tem por objetivo elaborar uma programação de experimentos em que são estabelecidos quais e de que maneira são arrançadas as variáveis de entrada no sistema, de modo a permitir a observação e identificação das causas de alteração nas variáveis de saída ou

respostas do sistema. Para executar o planejamento fatorial é necessário definir os fatores (variáveis independentes) e os seus respectivos níveis, bem como as variáveis dependentes.

O desempenho dos pavimentos é afetado por diversos fatores, que incluem as características dos materiais que o compõem, o tráfego, a idade e as condições climáticas do local onde o pavimento construído permanecerá em serviço. Dentre os fatores citados foram selecionados para este estudo: a idade (tempo decorrido entre a construção e/ou reabilitação e a data da avaliação), o tráfego anual (número de solicitações equivalentes do eixo padrão) e o número estrutural corrigido, que é uma medida da capacidade estrutural do pavimento. Neste estudo, as variáveis dependentes consideradas são a irregularidade longitudinal, que representa a condição funcional, e a deformação permanente nas trilhas de roda, que representa a condição estrutural.

Os níveis dos fatores selecionados para este estudo são:

a) Seções de teste GPS-1:

Fator A: número estrutural corrigido

- nível a1: $S \leq 5,5$ (baixo);

- nível a2: $S > 5,5$ (alto).

Fator B: tráfego anual

- nível b1: $N \leq 4,0 \times 10^5$ (tráfego baixo);

- nível b2: $N > 4,0 \times 10^5$ (tráfego alto).

Fator C: idade

- nível c1: $I \leq 10$ anos (pavimento novo);

- nível c2: $I \geq 11$ anos (pavimento velho).

b) Seções de teste GPS-2:

Fator A: número estrutural corrigido

- nível a1: $S \leq 6,0$ (baixo);

- nível a2: $S > 6,0$ (alto).

Fator B: tráfego anual

- nível b1: $N \leq 2,0 \times 10^5$ (tráfego baixo);

- nível b2: $N > 2,0 \times 10^5$ (tráfego alto).

Fator C: idade

- nível c1: $I \leq 14$ anos (pavimento novo);

- nível c2: $I \geq 15$ anos (pavimento velho).

Neste trabalho, cada célula da matriz fatorial tem pelo menos três elementos. Para fins de análise estatística foram consideradas sempre três réplicas, mesmo para células com quatro ou mais elementos, utilizando-se o seguinte procedimento: para cada célula foram calculados a média aritmética e o desvio padrão dos valores da variável dependente e, por tentativa, foram escolhidos três valores que resultaram em média e desvio padrão aproximadamente iguais aos dos valores iniciais.

A influência da variação dos fatores no desempenho dos pavimentos foi avaliada utilizando-se a técnica de planejamento fatorial, sendo que a significância do efeito da variação de cada fator e dos efeitos de interação entre os fatores foi estimada através do método de análise de variância (ANOVA).

Os modelos estatísticos, que representam os efeitos dos fatores número estrutural corrigido, tráfego anual e idade sobre o desempenho dos pavimentos, quantificados em termos da irregularidade longitudinal e da deformação permanente nas trilhas de roda, com os seus respectivos coeficientes de determinação, são apresentados a seguir:

a) Irregularidade Longitudinal para as seções GPS-1 (IRI, em m/km)

$$IRI = 0,99 - 0,216P(S) + 0,05P(N) + 0,70P(I) + 0,65P(N)P(I) - 0,20P(S)P(I) \quad (1)$$

$$R^2 = 0,75$$

b) Deformação Permanente para as seções GPS-1 (DP, em mm)

$$DP = 8,02 - 0,503P(S) - 1,56P(N) + 6,63P(I) + 2,61P(S)P(N) - 2,79P(S)P(I) + 2,88P(N)P(I) \quad (2)$$

$$R^2 = 0,75$$

c) Irregularidade Longitudinal para as seções GPS-2 (IRI, em m/km)

$$IRI = 1,13 - 0,146 \times P(S) + 0,165 \times P(N) + 0,457 \times P(I) + 0,044P(S)P(I) \quad (3)$$

$$R^2 = 0,78$$

d) Deformação Permanente para as seções GPS-2 (DP, em mm)

$$DP = 6,4 - 0,355P(S) + 5,99P(N) + 1,69P(I) - 2,032P(S)P(N) + 1,52P(S)P(I) + 1,84P(N)P(I) \quad (4)$$

$$R^2 = 0,73$$

As equações polinomiais lineares para as seções de teste GPS-1 são:

$$P(S) = \frac{S - 5,5}{2,5}$$

$$P(N) = \frac{N - 4,0 \times 10^5}{8,0 \times 10^5}$$

$$P(I) = \frac{I - 10}{9}$$

As equações polinomiais lineares para as seções de teste GPS-2 são:

$$P(S) = \frac{S - 6}{4}$$

$$P(N) = \frac{N - 2,0 \times 10^5}{9,0 \times 10^5}$$

$$P(I) = \frac{I - 14}{13}$$

4. COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE DESEMPENHO

Os modelos de desempenho estatísticos, obtidos através do uso da análise de variância, são comparados com os modelos desenvolvidos por Queiroz (1981), Paterson (1987), Marcon (1996) e Yshiba (2003) e também com os modelos de deterioração contidos no programa HDM-4. Os parâmetros analisados foram a irregularidade longitudinal da superfície e a deformação permanente nas trilhas de roda.

4.1. Irregularidade Longitudinal (IRI, em m/km)

Como pode ser observado na Figura 1, representativa dos resultados obtidos, os valores de irregularidade longitudinal da seção de teste 12-9054 (GPS-1) são inferiores aos previstos pelos modelos de desempenho desenvolvidos por Queiroz (1981), Paterson (1987), Marcon (1996) e Yshiba (2003). Esses modelos foram desenvolvidos com dados de rodovias brasileiras e todos possuem uma constante que representa a irregularidade longitudinal inicial, que está associada à condição da malha viária. Essa mesma verificação pode ser estendida às outras seções de teste LTPP.

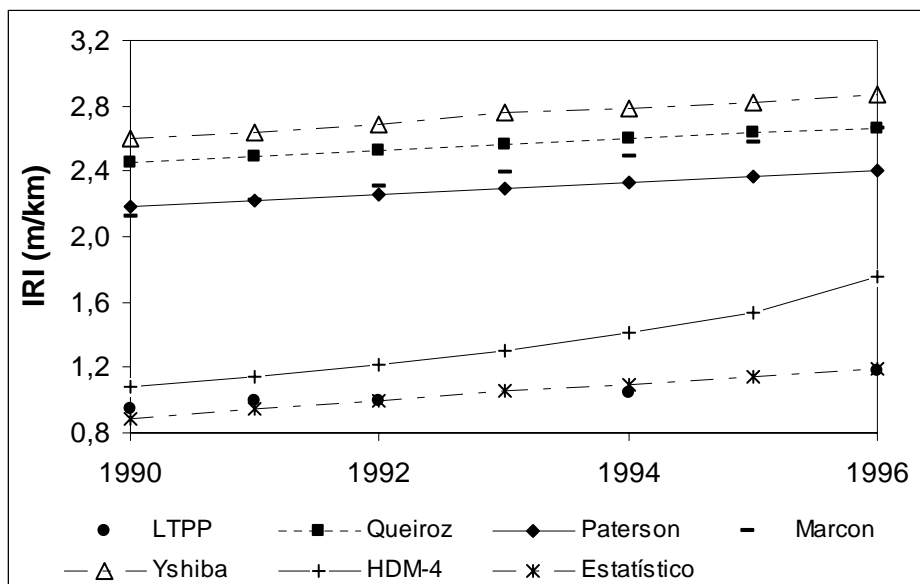


Figura 1: Valores de IRI (m/km) para a seção de teste 12-9054 (GPS-1)

Como as seções de teste LTPP apresentam irregularidade longitudinal inicial inferior ao valor das constantes propostas pelos modelos, fez-se necessário um ajuste para que a análise da progressão da irregularidade longitudinal pudesse ser realizada. Foi estipulado um valor de irregularidade longitudinal inicial (IRI_0) conforme o valor adotado pelo programa HDM-4 ($IRI_0 \geq 0,5$).

A Figura 2 apresenta os valores de irregularidade longitudinal para os modelos ajustados da seção de teste 12-9054 (GPS-1), ilustrativa do que ocorre com as outras seções. O modelo de previsão da irregularidade longitudinal contido no HDM-4 considera $IRI_0=0,5$ m/km, sendo, portanto, desnecessário ajustá-lo.

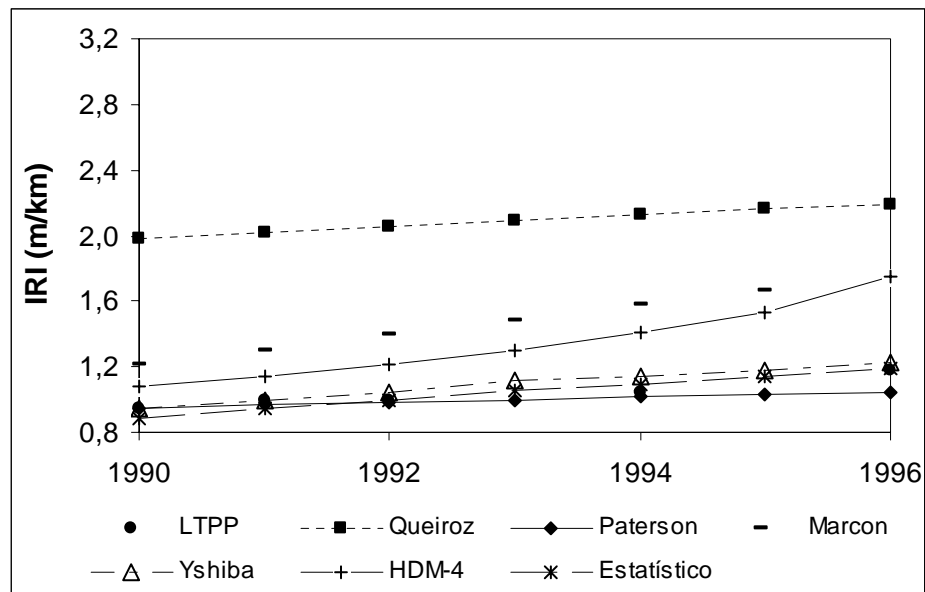


Figura 2: Valores ajustados de IRI (m/km) para a seção de teste 12-9054 (GPS-1)

4.2. Deformação Permanente (DP, em mm)

Como pode ser observado na Figura 3, representativa dos resultados obtidos, os valores de deformação permanente da seção de teste 12-4154 (GPS-1) são superiores aos previstos pelos modelos de desempenho desenvolvidos por Paterson (1987) e Marcon (1996). Esses modelos foram desenvolvidos com dados de rodovias brasileiras e eles possuem uma constante que está associada à condição da malha viária. Essa mesma verificação pode ser estendida às outras seções de teste LTPP.

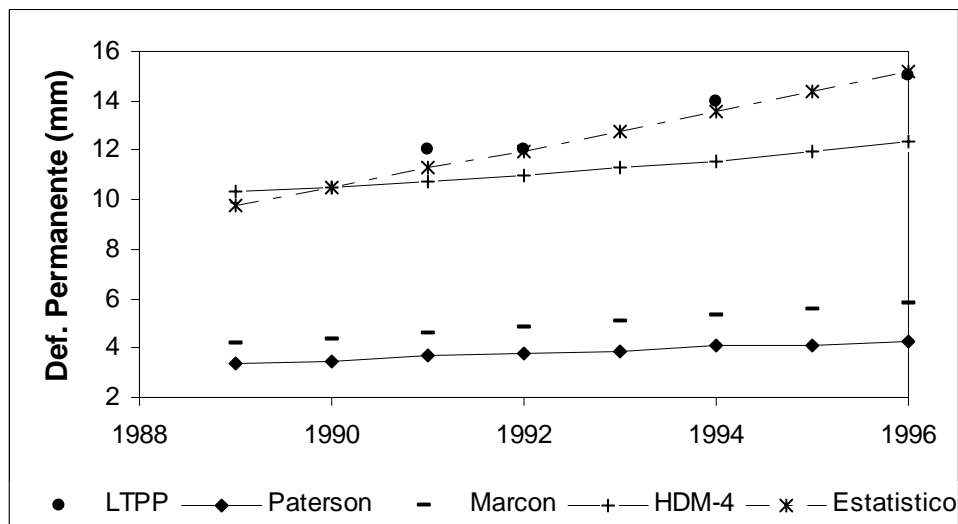


Figura 3: Valores de DP (mm) para a seção de teste 12-4154 (GPS-1)

Assim, para que a análise da progressão da deformação permanente pudesse ser realizada, foi estipulado um valor de ajuste para cada seção, fazendo com que o valor da deformação permanente coincidisse para o primeiro ano da análise. A Figura 4 apresenta os valores de deformação permanente para os modelos ajustados da seção de teste 12-4154 (GPS-1).

O modelo da deformação permanente contido no HDM-4 não foi ajustado, pois os dados de entrada do modelo foram obtidos do banco de dados LTPP-FHWA. Além disso, o modelo é aplicável em muitos países e, portanto, desejava-se analisar a adequação do modelo às condições locais.

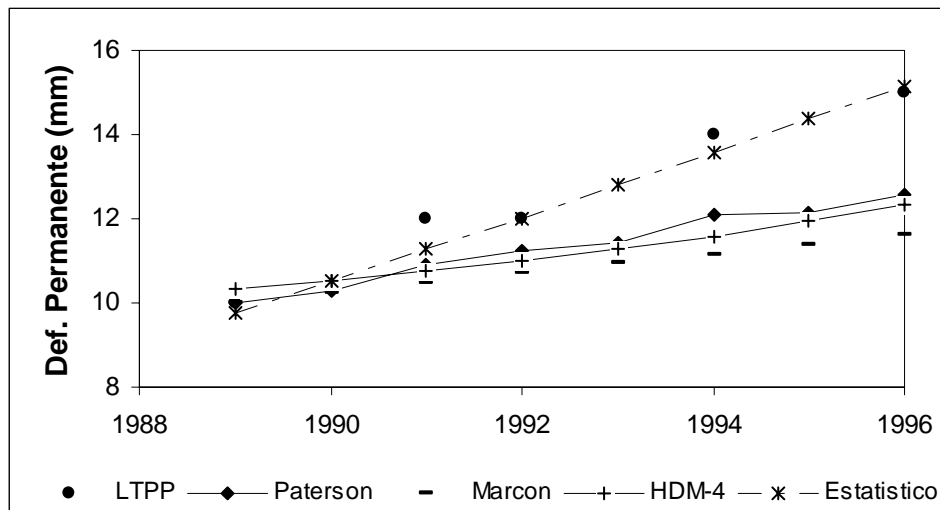


Figura 4: Valores ajustados de DP (mm) para a seção de teste 12-4154 (GPS-1)

4.3. Teste de Tukey

Os dados de irregularidade longitudinal e de deformação permanente, previstos por todos os modelos de previsão de desempenho analisados, foram submetidos à análise de variância e suas médias comparadas pelo teste de Tukey, com auxílio do programa de estatística MINITAB 14. Para todos os dados foi realizada, previamente, a verificação da distribuição de probabilidade segundo a distribuição normal.

a) Irregularidade Longitudinal GPS-1

Tabela 1: Comparação para as médias de IRI GPS-1 (Teste de Tukey)

Tratamentos	Média	IC 95% (yi-yj)
Estatístico	1,0425	
Queiroz	0,9140	(-0,1526 ; -0,1042)
Paterson	1,0466	(-0,0201 ; 0,0284)
Marcon	0,9474	(-0,1193 ; -0,0708)
Yshiba	1,0320	(-0,0347 ; 0,0137)
HDM-4	0,9683	(-0,0984 ; -0,0499)

Como pode ser verificado, não existe diferença estatisticamente significativa dos valores de IRI GPS-1 para os modelos de Paterson e Yshiba, quando comparados com os dados observados.

b) Deformação Permanente GPS-1

Tabela 2: Comparação para as médias de DP GPS-1 (Teste de Tukey)

Tratamentos	Média	IC 95% (yi-yj)
Estatístico	1,7444	
Paterson	1,7549	(-0,0461 ; 0,0670)
Marcon	1,7109	(-0,0901 ; 0,0231)
HDM-4	1,8255	(0,0245 ; 0,1377)

Como pode ser verificado, não existe diferença estatisticamente significativa dos valores de DP GPS-1 para os modelos de Paterson e Marcon, quando comparados com os dados observados.

c) Irregularidade Longitudinal GPS-2

Tabela 3: Comparação para as médias de IRI GPS-2 (Teste de Tukey)

Tratamentos	Média	IC 95% (yi-yj)
Estatístico	0,9944	
Queiroz	0,8028	(-0,2415 ; -0,1418)
Paterson	1,0274	(-0,0170 ; 0,0828)
Marcon	0,8231	(-0,2212 ; -0,1214)
Yshiba	0,9668	(-0,0775 ; 0,0223)
HDM-4	0,7970	(-0,2473 ; -0,1475)

Como pode ser verificado, não existe diferença estatisticamente significativa dos valores de IRI GPS-2 para os modelos de Paterson e Yshiba quando comparados com os dados observados.

d) Deformação Permanente GPS-2

Tabela 4: Comparação para as médias de DP GPS-2 (Teste de Tukey)

Tratamentos	Média	IC 95% (yi-yj)
Estatístico	1,7265	
Paterson	1,7205	(-0,1181 ; 0,1061)
Marcon	1,7052	(-0,1334 ; 0,0908)
HDM-4	1,9545	(0,1159 ; 0,3401)

Como pode ser verificado, não existe diferença estatisticamente significativa dos valores de DP GPS-2 para os modelos de Paterson e Marcon quando comparados com os dados observados.

5. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que, para os dados analisados (base de dados LTPP–FHWA), os modelos de previsão da irregularidade longitudinal desenvolvidos por Paterson (1987) e Yshiba (2003) apresentam os resultados mais próximos entre suas previsões e os valores observados. Quanto a esses modelos, deve-se destacar que ambos consideram como fatores principais a idade, o tráfego e o número estrutural corrigido. Por meio da análise da média dos tratamentos, pode-se concluir que o modelo de previsão de desempenho desenvolvido por Paterson (1987) é estatisticamente melhor para as seções classificadas como GPS-1 e o modelo desenvolvido por Yshiba (2003) para as seções GPS-2.

Do mesmo modo, pode-se notar que os modelos de deformação permanente desenvolvidos por Paterson (1987) e Marcon (1996) apresentam previsões mais próximas aos valores observados. Por meio da análise da média dos tratamentos, pode-se concluir que o modelo de previsão de desempenho desenvolvido por Paterson (1987) é estatisticamente melhor para as seções classificadas como GPS-1 e GPS-2. Deve-se ressaltar que esse modelo considera como fatores principais a idade, o tráfego e o número estrutural corrigido, sendo que o modelo desenvolvido por Marcon (1996) considera somente o fator idade.

Os modelos desenvolvidos nesta pesquisa e, também, os modelos desenvolvidos por Yshiba (2003) evidenciam a importância do emprego da análise estatística fatorial para o estabelecimento dos modelos de desempenho, que permite a identificação não só dos fatores significativos, mas também das interações que afetam as variáveis dependentes. Trata-se de um método capaz de ser aplicado a malhas viárias de regiões com características distintas de clima, tráfego, capacidade de suporte do subleito, tipo de materiais, além de diferentes técnicas e controles construtivos, pois a matriz fatorial é definida de forma a representar os intervalos com que os fatores significativos se apresentam.

Os modelos de previsão da irregularidade longitudinal desenvolvidos por Queiroz (1981), Marcon (1996) e HDM-4 e o modelo de previsão da deformação permanente contido no HDM-4 apresentaram diferença estatisticamente significativa quando comparados com os dados do LTPP-FHWA.

O modelo de irregularidade longitudinal desenvolvido por Queiroz (1981) não aceitou o ajuste feito neste trabalho, no qual foi estipulado um valor de irregularidade longitudinal inicial ($IRI_0 \geq 0,5$ ou $QI \geq 6,5$). Assim, pode-se concluir que a simples substituição de sua variável independente pelo valor sugerido neste trabalho não é suficiente para adequá-lo aos padrões das rodovias americanas.

Os modelos de previsão de desempenho contidos no HDM-4 não apresentaram bons resultados nem para a previsão da irregularidade longitudinal e nem para a deformação permanente. Provavelmente porque o programa exige a calibração de um grande número de variáveis de entrada, o que torna sua utilização vinculada a um banco de dados extenso, nem sempre disponível.

Os valores de irregularidade longitudinal e de deformação permanente obtidos pelo HDM-4, na maioria dos casos, são superiores aos valores observados nas seções de teste LTPP-

FHWA, evidenciando que os dados de entrada utilizados para calibrar o modelo não foram suficientes para adequá-lo às condições locais.

Outra limitação para a utilização do programa HDM-4 refere-se a progressão da irregularidade longitudinal, pois considera uma progressão muito mais rápida para a condição limite (IRI = 16 m/km) do que a progressão apresentada pelas seções de teste LTPP-FHWA e pelos outros modelos de desempenho analisados neste trabalho.

Agradecimento

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Elkins, G. E.; P. Schmalzer; T. Thompson e A. Simpson (2003) *Long-Term Pavement Performance. Information Management System Pavement Performance Database User Guide*. Federal Highway Administration.
- Federal Highway Administration – *LTPP DataPave Online*: banco de dados (2004). Disponível em: <http://www.datapave.com>.
- GEIPOT (1982) *Pesquisa sobre o Inter-relacionamento dos Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias*. Relatório Final - 1981. Ministério dos Transportes. Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes. Brasília – DF. 12 v.
- Haas, R.; W. R. Hudson e J. Zaniewski (1994) *Modern Pavement Management*. Krieger Publishing Co, Malamar, Florida.
- Marcon, A. F. (1996) *Contribuição ao Desenvolvimento de um Sistema de Gerência de Pavimentos para a Malha Rodoviária Estadual de Santa Catarina*. Tese (Doutorado). São José dos Campos. Instituto de Aeronáutica.
- Paterson, W. D. O. (1987) *Road Deterioration and Maintenance Effects – Models for Planning and Management*. The World Bank. Baltimore. The Johns Hopkins University Press.
- Queiroz, C. A. V. (1981) *Performance Prediction Models for Pavement Management in Brazil*. Austin. 317p. Dissertation for Degree of Doctor of Philosophy. The University of Texas at Austin. Texas.
- Queiroz, C. A. V. (1984) *Modelos de Previsão do Desempenho para a Gerência de Pavimentos no Brasil*. Brasília/ DF – GEIPOT.
- Shahin, M. Y. (1994) *Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts.
- Yshiba, J. K. (2003) *Modelo de Desempenho de Pavimentos: Estudo de Rodovias do Estado do Paraná*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

Endereço dos Autores:

Deise Menezes Nascimento (engdeise@yahoo.com.br)

José Leomar Fernandes Júnior (leomar@sc.usp.br)

Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Av. Trabalhador São-carlense, 400 - CEP 13566-590 - São Carlos, SP, Brasil

Fone: (16) 3373-9598; Fax: (16) 3373-9602.