



Acta Scientiarum. Technology

ISSN: 1806-2563

eduem@uem.br

Universidade Estadual de Maringá  
Brasil

Kiynha Yshiba, José; Fernandes Junior, José Leomar  
Modelos estatísticos para previsão de desempenho de pavimentos  
Acta Scientiarum. Technology, vol. 27, núm. 2, julio-diciembre, 2005, pp. 175-181  
Universidade Estadual de Maringá  
Maringá, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303226514002>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe , Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# Modelos estatísticos para previsão de desempenho de pavimentos

José Kiynha Yshiba<sup>1\*</sup> e José Leomar Fernandes Junior<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Avenida Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. <sup>2</sup>Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, 13560-970, São Carlos, São Paulo, Brasil. \*Autor para correspondência. e-mail: jkyshiba@uem.br

**RESUMO.** Este trabalho desenvolve modelos estatísticos para previsão do desempenho de pavimentos baseados em séries históricas de dados, que são arranjados em matrizes fatoriais visando à identificação dos fatores e interações que têm efeitos significativos sobre os parâmetros de desempenho dos pavimentos e o estabelecimento de equações de regressão através de Análise de Variância (ANOVA). Os modelos de desempenhos desenvolvidos neste trabalho, quando comparados com equações desenvolvidas por pesquisadores e órgãos rodoviários brasileiros e estrangeiros, apresentam melhores resultados, evidenciando as limitações de modelos de desempenho desenvolvidos e calibrados sob condições específicas.

**Palavras-chave:** sistema de gerência de pavimentos, modelos de desempenho de pavimentos, planejamento fatorial.

**ABSTRACT. Statistical models for prediction of pavements performance.** This work develops statistical models for prediction of pavements performance based on historical series of data that are arranged in a factorial array aiming the identification of significant factors and interactions. It was performed an Analysis of Variance (ANOVA), which also allows the development of regression equations. The performance prediction models developed in this work show better results than equations developed by Brazilian and foreign researches and highway agencies, in a clear evidence of the limitation of models developed and calibrated under specific conditions.

**Key words:** pavements management system, pavements performance models, factorial planning.

## Introdução

A tomada de decisão em gerência de pavimentos depende, dentre outros fatores, da estimativa da evolução da condição do pavimento ao longo do tempo. Tal estimativa é obtida por uma função que relaciona as causas e os efeitos da deterioração dos pavimentos, denominada modelo de desempenho.

Os modelos de desempenho são elaborados para estimar a variação das condições funcional e estrutural dos pavimentos por meio de fatores que provocam a sua deterioração (como, por exemplo, idade, solicitações do tráfego e fatores climáticos). É, portanto, indispensável para o administrador tomar decisões.

Cada Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) deve procurar desenvolver modelos de desempenho que atendam às suas necessidades e aos seus objetivos, retratando da melhor forma possível as características da região em estudo, com base nos dados coletados e nas experiências adquiridas com as avaliações dos pavimentos locais. A análise de comportamento dos pavimentos é feita em função

de fatores que refletem as suas condições funcionais e estruturais, sob as solicitações do clima e do tráfego.

No presente trabalho, a análise do comportamento dos pavimentos é efetuada utilizando-se uma programação fatorial que, por meio de análise de variância (ANOVA), permite a determinação do nível de significância de fatores pré-selecionados (variáveis independentes: tráfego, idade e estrutura do pavimento) bem como a modelagem do desempenho dos pavimentos (variáveis dependentes: irregularidade longitudinal e condição estrutural).

## Modelos de desempenho

Modelos de desempenho são ferramentas utilizadas para previsão da condição futura de uma seção de pavimento ao longo do tempo, vitais para o planejamento de atividades de manutenção e de reabilitação, para a estimativa dos recursos necessários para a preservação do pavimento, para a análise das consequências para a condição do

pavimento sob diferentes cenários orçamentários e para a análise econômica dos custos que ocorrem durante o ciclo de vida do pavimento. Uma das tarefas cruciais na implementação de um SGP é, portanto, a decisão sobre quais modelos de previsão de desempenho utilizar. Haas *et al.* (1994) agrupam os modelos de desempenho em:

**Puramente mecanísticos:** modelos baseados em parâmetros de respostas estruturais, como tensões, deformações ou deflexões do pavimento. Esses modelos não vêm sendo desenvolvidos porque os engenheiros rodoviários não utilizam parâmetros de respostas primárias para esses fins, mas as relacionam com defeitos ou com propriedades do pavimento;

**Empírico-mecanísticos:** modelos que relacionam variáveis dependentes de deterioração estrutural ou funcional com uma ou mais variáveis independentes, como suporte do subleito, solicitações do tráfego, espessuras e propriedades do pavimento etc. Por exemplo, Queiroz (1981) apresenta equações obtidas a partir dos estudos da PICR – Pesquisa de Inter-Relacionamento de Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias (Geipot, 1981) – que relacionam algumas respostas estruturais (tensões horizontais de tração, deformação e energia de deformação na base do revestimento asfáltico, tensão e deformação vertical de compressão no topo do subleito) com a irregularidade longitudinal, solicitações do tráfego até o aparecimento da primeira trinca e evolução da área trincada;

**Empíricos ou de regressão:** modelos em que as variáveis dependentes que caracterizam a deterioração estrutural ou funcional são relacionadas com uma ou mais variáveis independentes, como suporte do subleito, aplicações de carga por eixo (número N), espessuras e propriedades dos materiais que constituem as camadas do pavimento, idade, fatores ambientais e suas interações. Os modelos empíricos são formulados a partir da análise estatística de dados de desempenho levantados em pavimentos existentes. Exemplo deste tipo de modelo foi desenvolvido por Queiroz (1981) e Paterson (1987), com dados coletados quando da PICR (Geipot, 1981);

**Probabilísticos:** modelos em que a experiência de engenheiros e de técnicos é formalizada por meio de processos de transição, como o processo de Markov, que permite a estimativa da condição futura, geralmente em termos de um índice de defeitos combinado (como o ICP, Índice de Condição dos Pavimentos), a partir de matrizes de probabilidade de transição. Vários organismos rodoviários

implementaram modelos probabilísticos utilizando o processo de Markov (Butt *et al.*, 1987; Feighan *et al.*, 1989; Scherer e Glaigola, 1994; Wang *et al.*, 1994).

### Metodologia

Neste trabalho, para o desenvolvimento dos modelos de desempenho de pavimentos, utilizam-se o planejamento fatorial para identificação dos fatores e interações mais significativos sobre os parâmetros de desempenho dos pavimentos e a análise de variância para o estabelecimento de equações de regressão.

O planejamento fatorial tem por objetivo elaborar uma programação de experimentos, em que são estabelecidos quais e de que maneira são arranjadas as variáveis de entrada no sistema, de modo a permitir a observação e a identificação das causas de alteração nas variáveis de saída ou respostas do sistema. Um experimento bem planejado é capaz de quantificar a influência de cada um das variáveis de entrada e de suas interações sobre as respostas do sistema, com um número de ensaios não superior ao necessário e suficiente (Montgomery, 1991).

No planejamento de um experimento, é necessária, *a priori*, a definição dos fatores (variáveis independentes) e de seus respectivos níveis, bem como das variáveis dependentes a serem medidas. Vários são os fatores que afetam o desempenho dos pavimentos, mas a inclusão de muitos fatores implicaria grande quantidade de dados, custos elevados e demora para o estudo. Por exemplo, os programas para gerência de pavimentos rodoviários HDM-III e HDM-IV consideram que a evolução da deterioração de um pavimento depende, fundamentalmente, de quatro variáveis globais: tráfego, idade do pavimento, clima e capacidade estrutural. A faixa coberta por esses fatores, ou seja, o intervalo entre os níveis inferiores e superiores considerados, define o espaço de inferência no qual os resultados são aplicáveis.

As variáveis dependentes são o resultado das avaliações efetuadas nos pavimentos em serviço e representam sua condição funcional ou estrutural. As avaliações normalmente realizadas em gerência de pavimentos são as seguintes: avaliação subjetiva da condição da superfície do pavimento; avaliação funcional (irregularidade longitudinal do pavimento); avaliação estrutural (deflexão recuperável do pavimento).

As réplicas são importantes para a estimativa do erro experimental. São repetições de avaliações em seções de pavimento pertencentes à mesma célula da matriz fatorial, cujos resultados foram obtidos com as mesmas equipes de campo e com os mesmos

equipamentos, seguindo os mesmos procedimentos e em um mesmo espaço de inferência (região delimitada por iguais condições geológicas e climáticas).

Um determinado fator é tido como sendo o responsável pelas variações nas respostas de um experimento fatorial mediante a utilização de testes de significância. Isso é feito por meio de formulação de hipóteses estatísticas: hipótese nula e hipótese alternativa. A determinação do nível de significância de um fator ou interação é realizada, geralmente, por meio do teste *F*, de Snedecor, que compara o valor *F* de um fator ou interação com um valor limite de *F* (*F<sub>lim</sub>*), encontrado em tabelas estatísticas (Box *et al.*, 1978), segundo o nível de significância adotado.

A análise de variância de um experimento fatorial permite não só a identificação dos fatores significativos, mas também o desenvolvimento de modelos de regressão, que relacionam os fatores significativos (variáveis independentes  $x_i$ ) com a resposta do processo (variável dependente  $Y$ ). Segundo John (1971), fatores quantitativos com níveis igualmente espaçados resultam em polinômios ortogonais e facilitam os cálculos para determinação dos modelos polinomiais por meio do método dos mínimos quadrados. Um experimento fatorial também permite o cálculo do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) do modelo, a partir das somas de quadrados dos fatores e interações significativas (aqueles que entram na equação de regressão).

#### **Estudo da malha rodoviária do Paraná**

##### **Fatores que condicionam o desempenho dos pavimentos**

O primeiro passo para o desenvolvimento dos modelos de desempenho é a identificação e definição da malha. De acordo com Haas *et al.* (1994), as informações ambientais (climáticas e geotécnicas), as características dos pavimentos (tipo e estrutura) e o tráfego representam os fatores que influenciam o desempenho do pavimento e que podem ser incluídos como variáveis independentes nos modelos de previsão de desempenho dos pavimentos.

Dentre as cinco regiões geomorfológicas em que se divide o Estado do Paraná, a região de basalto foi escolhida como área de estudo em razão da sua importância socioeconômica e das condições climáticas que nela predominam. É a que tem maior área geográfica, com uma superfície equivalente a 42% da área do total do território do Estado, e nela se concentra a maior parte da população, sendo, também, responsável por um percentual significativo da produção agrícola bem como das

atividades comerciais e industriais. Conseqüentemente, gera consideráveis volumes de tráfego que transitam em mais de cinco mil e trezentos quilômetros de rodovias pavimentadas, que correspondem a mais de 50% da malha rodoviária estadual.

Na região selecionada, não é possível a consideração do fator "condições climáticas", porque o clima pode ser considerado uniforme (Iapar, 2002). Quanto ao subleito, os solos argilosos são originados do basalto, com predominância de Latossolos Roxos e Terra Roxa Estruturada (Atlas Geográfico, 1983). Esses solos apresentam valores de Índice de Suporte de Califórnia (CBR) entre 9% e 17% e expansão inferior a 2%, quando compactados na energia normal. Foram selecionadas seções de pavimentos com revestimentos de concreto asfáltico, bases e sub-base de brita graduada, cuja extensão corresponde, aproximadamente, a 1500 km de rodovias pavimentadas (DER-PR, 1999).

A capacidade estrutural dos pavimentos foi determinada com a utilização do número estrutural corrigido, que leva em conta a resistência do subleito (Queiroz, 1981):

$$SNC = SN + 3,51 \log CBR - 0,85(\log CBR)^2 - 1,43 \quad (1)$$

onde SN é o número estrutural corrigido (AASHTO, 1986);

CBR é o índice de suporte Califórnia do subleito, nas condições de umidade e peso específico aparente in situ [%].

O número de solicitações equivalentes do eixo padrão (*N*) foi estimado a partir dos volumes médios diários e das respectivas taxas de crescimento, sendo que tais parâmetros de tráfego foram determinados com base nas séries históricas de tráfego e em contagens volumétricas classificatórias efetuadas em cada seção (DER-PR, 1996).

A frota de veículos circulante foi classificada em carros de passeio, ônibus, caminhões leves, caminhões médios, caminhões pesados e reboques e semi-reboques. Foram calculados os percentuais de participação de cada categoria de veículo em cada seção de pavimento, sendo que, para os veículos de carga, os Fatores de Veículos (Tabela 1) foram determinados a partir de resultados obtidos em postos de pesagem localizados no Estado do Paraná (DNER, 1988). Por sua vez, os Fatores de Equivalência de Cargas foram determinados mediante o uso de expressões estabelecidas pela AASHTO (1986).

**Tabela 1.** Fatores de Veículos adotados por grupo de veículos de carga.

Tipo de grupo de veículos	Fatores de veículos
Ônibus	0,67
Caminhões médios	0,44
Caminhões pesados	0,92
Caminhões articulados	3,16

**Matrizes fatoriais**

Com base no inventário realizado em 1995, em seções de pavimentos de concreto asfáltico não reabilitadas, foram selecionados os fatores e os níveis correspondentes:

Fator A: idade, com três níveis, codificados, para efeito de análise estatística, por a1 (-1), a2 (0) e a3 (+1):

nível a1: Ib ≤ 8 anos (pavimento novo);

nível a2: 9 ≤ Im ≤ 16 anos (pavimento de idade intermediária);

nível a3: Ia ≥ 17 anos (pavimento velho).

Fator B: tráfego anual, com dois níveis, codificados por b1(-1) e b2(+1):

nível b1: Nb ≤ 5×104 (tráfego baixo);

nível b2: Na > 5×104 (tráfego alto).

Fator C: número estrutural corrigido, com dois níveis, codificados por c1(-1) e c2(+1):

nível c1: Sb ≤ 5,5 (baixo);

nível c2: Sa > 5,5 (alto).

A variável quantitativa idade é dividida em 3 níveis igualmente espaçados. As características de tráfego e número estrutural da região em estudo não permitiram a divisão em três níveis. Duas réplicas (r1 e r2) foram consideradas em cada uma das células da matriz fatorial (Tabelas 2 e 3). Réplica é o número de vezes que uma mesma observação é repetida.

**Tabela 2.** Matriz fatorial com os resultados de irregularidade longitudinal (avaliação funcional).

N <sub>b</sub>				N <sub>a</sub>				
S <sub>b</sub>		S <sub>a</sub>		S <sub>b</sub>		S <sub>a</sub>		
r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>							
I <sub>b</sub>	2,5	2,1	2,1	2,0	3,2	2,4	2,7	2,3
I <sub>m</sub>	3,0	2,2	2,5	2,1	3,8	2,8	3,3	2,8
I <sub>a</sub>	3,0	2,7	2,7	2,3	4,1	3,3	3,6	3,0

**Tabela 3.** Matriz fatorial com os resultados de deflexão (avaliação estrutural).

N <sub>b</sub>				N <sub>a</sub>				
S <sub>b</sub>		S <sub>a</sub>		S <sub>b</sub>		S <sub>a</sub>		
r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>							
I <sub>b</sub>	58	42	43	25	61	54	57	39
I <sub>m</sub>	64	50	62	44	70	60	61	52
I <sub>a</sub>	70	56	65	48	80	62	67	59

**Análise de variância**

A partir da matriz fatorial é feita a análise de variância, que permite identificar fatores e interações

mais significativos sobre o desempenho do pavimento (Tabelas 4 e 5) e obter equações de regressão que podem representar modelos de previsão de desempenho de cada matriz fatorial.

**Tabela 4.** Resumo da análise de variância dos resultados de irregularidade longitudinal (IRI).

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Coeficientes de Regressão	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F <sup>a</sup>
SQ(A <sub>linear</sub> )	2,326	0,38	1	2,33	155,71*
SQ(A <sub>quadrática</sub> )	0,000	0,00	1	0,00	0,01
SQ(B)	2,282	0,31	1	2,28	152,76*
SQ(C)	0,602	-0,16	1	0,60	40,28*
SQ(AlxB)	0,141	0,09	1	0,14	9,42*
SQ(AqxB)	0,010	-0,01	1	0,01	0,68
SQ(AlxC)	0,106	-0,08	1	0,11	7,07**
SQ(AqxC)	0,025	-0,02	1	0,03	1,69
SQ(BxC)	0,007	0,02	1	0,010	0,45
Réplica	1,602		1	1,60	107,21
Resíduo	0,194		13	0,010	
SQ <sub>total</sub>	7,293	2,78	23	0,32	21,23

\*Teste F de Snedecor; \*Significância de 1% : 9,07; \*\*Significância de 5%: 4,67; \*\*\*Significância de 10%: 3,14.

em que SQ(A<sub>linear</sub>): soma de quadrados da componente linear do Fator A;

SQ(A<sub>quadrática</sub>): soma de quadrados da componente quadrática do Fator A;

SQ(B): soma de quadrados da componente linear do Fator B;

SQ(C): soma de quadrados da componente linear do Fator C;

SQ(AlxB): soma de quadrados da componente linear da interação dos Fatores A e B;

SQ(AqxB): soma de quadrados da componente quadrática da interação dos Fatores A e B;

SQ(AlxC): soma de quadrados da componente linear da interação dos Fatores A e C;

SQ(AqxC): soma de quadrados das componentes da interação dos Fatores A e C;

SQ(BxC): soma de quadrados da componente linear das interações dos Fatores B e C;

SQ<sub>total</sub>: soma de quadrados total.

**Tabela 5.** Resumo da análise de variância dos resultados de deflexão (DEF).

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Coeficientes de Regressão	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F <sup>a</sup>
SQ(A <sub>linear</sub> )	1027,563	8,69	1	1207,56	64,21*
SQ(A <sub>quadrática</sub> )	42,188	-0,94	1	42,19	2,94
SQ(B)	433,500	4,25	1	433,50	30,23*
SQ(C)	541,500	-4,75	1	541,50	37,76*
SQ(AlxB)	33,063	-1,44	1	33,06	2,31
SQ(AqxB)	22,688	0,69	1	22,64	1,58
SQ(AlxC)	52,562	1,81	1	51,56	3,67***
SQ(AqxC)	31,688	-0,81	1	31,69	2,21
SQ(BxC)	2,677	0,33	1	2,67	0,19
Réplica	1040,167		1	1040,17	
Resíduo	186,417		13	14,34	
SQ <sub>total</sub>	3594,000	56,00	23	156,26	10,90

\*Teste F de Snedecor; \*Significância de 1% : 9,07; \*\*Significância de 5%: 4,67; \*\*\*Significância de 10%: 3,14.

### Equações de regressão

Os modelos estatísticos que representam os efeitos dos fatores idade, tráfego e número estrutural sobre o desempenho dos pavimentos quantificados em termos de Irregularidade Longitudinal (IRI) e Deflexão dos pavimentos (DEF), com os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), são apresentados a seguir:

Irregularidade Longitudinal do Pavimento (IRI, em m/km)

$$\begin{aligned} IRI &= 2,8 + 0,38 \times P(I) + 0,31 \times P(N) - 0,16 \times \\ &\quad \times P(S) + 0,09 \times P(I) \times P(N) - 0,08 \times P(I) \times P(S) \quad (2) \\ R^2 &= 0,75 \end{aligned}$$

Deflexão Máxima Recuperável (DEF, em 0,01 mm)

$$\begin{aligned} DEF &= 56,0 + 8,7 \times P(I) + 4,25 \times \\ &\quad \times P(N) - 4,75 \times P(S) + 1,81 \times P(I) \times P(S) \quad (3) \\ R^2 &= 0,62 \end{aligned}$$

onde  $P(I) = \frac{I - 13}{8}$

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

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

I é a idade [anos];

N é o número de solicitações do tráfego;

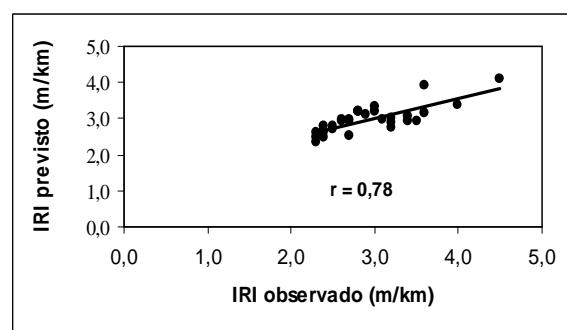
S é o Número Estrutural Corrigido.

### Resultados e discussão

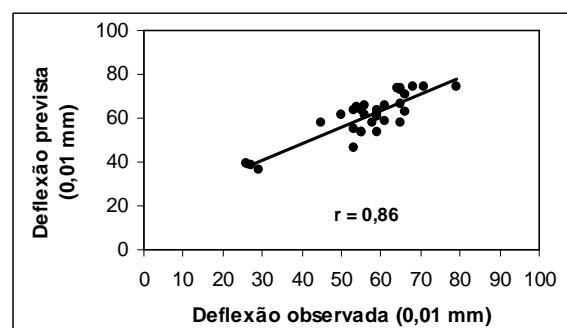
#### Análise dos resíduos e dos coeficientes de correlação

A análise de resíduos e dos coeficientes de correlação, a partir dos valores previstos pelos modelos e dos valores observados, permite a verificação da eficácia dos modelos estatísticos obtidos por meio de análise de regressão. É importante destacar que os valores observados foram levantados em 1998, em seções de pavimentos diferentes das que foram consideradas para o desenvolvimento dos modelos de previsão de desempenho.

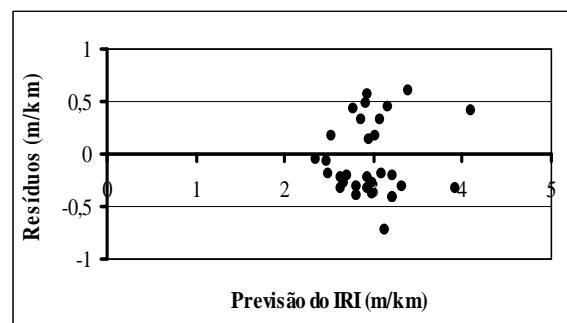
Observa-se uma correlação satisfatória ( $r = 0,78$ , Figura 1 e  $r = 0,86$ , Figura 2) e também a distribuição aleatória dos resíduos em torno de zero (Figuras 3 e 4), aspectos estatísticos favoráveis à utilização dos modelos de previsão da irregularidade e da deflexão desenvolvidos neste trabalho.



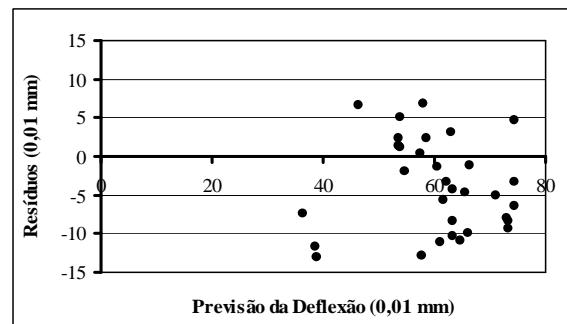
**Figura 1.** Correlação dos valores observados de IRI em relação aos valores previstos pela Equação 2.



**Figura 2.** Correlação dos valores observados de deflexão em relação aos valores previstos pela Equação 3.



**Figura 3.** Resíduos dos valores de IRI previstos pela Equação 2.



**Figura 4.** Resíduos dos valores de deflexão previstos pela Equação 3.

### Comparação dos modelos estatísticos com modelos de desempenho existentes

Os modelos de desempenho estatísticos obtidos por meio do uso da análise de variância são comparados com modelos desenvolvidos por pesquisadores e organismos rodoviários nacionais e estrangeiros. Os parâmetros analisados foram a irregularidade longitudinal e a deflexão do pavimento.

Foram selecionados, para fins de comparação com os modelos desenvolvidos, os seguintes modelos:

Equação empírica estabelecida por Queiroz (1981), com base nos dados coletados da PICR e utilizada no método de projeto de reabilitação DNER-PRO 159/85 (DNER, 1985):

$$\begin{aligned} QI = & 12,63 - 5,16RH + 3,31ST + 0,393I + \\ & + 8,66\log(NA/S) + 7,17 \times 10^{-5} (DEF_{vB} \times \log NA)^2 \quad (4) \\ R^2 = & 0,52 \end{aligned}$$

Equação empírica estabelecida por Paterson (1987) por meio de análise de regressão dos dados coletados na PICR:

$$\begin{aligned} IRI = & [1,923 + 0,725(1+S)^{-4,99} \times YE4] \times e^{0,0153I} \quad (5) \\ R^2 = & 0,75 \end{aligned}$$

Equações obtidas por Marcon (1996) por meio de análise de regressão de dados coletados na malha rodoviária do Estado de Santa Catarina:

$$\begin{aligned} QI = & 18,348 + 1,1635I \quad (6) \\ R^2 = & 0,29 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} DEF_{vB} = & 24,288 + 3,5458 \times I \quad (7) \\ R^2 = & 0,37 \end{aligned}$$

onde QI: quociente de irregularidade do pavimento [contagens / km];

RH: indicador do estado de reabilitação;

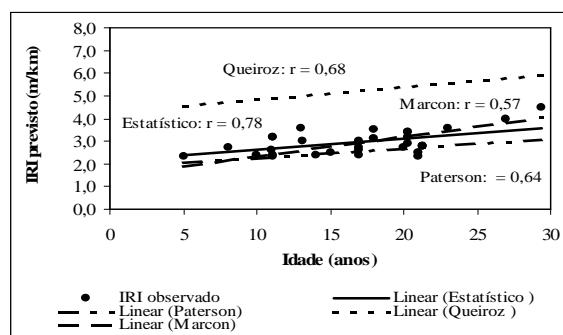
ST: indicador do tipo do pavimento;

NA: número de eixos cumulativos equivalentes ao eixo padrão;

DEF<sub>vB</sub>: deflexão obtida pela viga Benkelman [0,01 mm];

YE4: número equivalente de operações do eixo padrão, calculada pelo método da AASHTO, em milhões por faixa.

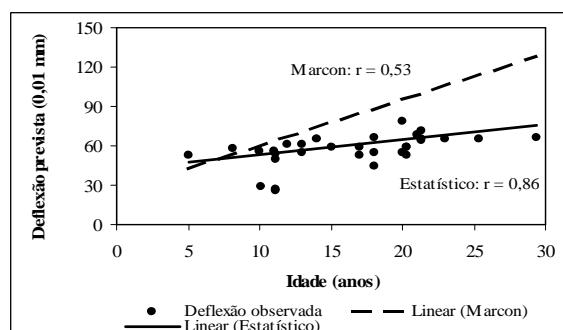
Valores de IRI obtidos de levantamento realizado em 1998 são plotados na Figura 5.



**Figura 5.** Análise comparativa do modelo de desempenho estatístico com outros modelos para previsão do IRI.

Pode-se observar que as inclinações das retas do modelo estatístico e dos modelos desenvolvidos por Queiroz (1981) e por Paterson (1987), que consideram os fatores idade, tráfego e número estrutural, são praticamente iguais, indicando uma mesma tendência de comportamento ao longo do tempo. Porém, a análise estatística dos modelos e dos pontos observados destaca o melhor resultado do modelo desenvolvido neste trabalho (maior coeficiente de correlação, r).

Valores de deflexão obtidos de levantamento realizado em 1998 são plotados na Figura 6.



**Figura 6.** Análise comparativa do modelo de desempenho estatístico com outro modelo para previsão da deflexão.

Pode-se observar que as inclinações das retas do modelo estatístico e do modelo desenvolvido por Marcon (1996), que considera apenas o fator idade, são distintas, indicando uma diferente tendência de comportamento ao longo do tempo. Porém, a análise estatística dos modelos e dos pontos observados destaca o melhor resultado do modelo desenvolvido neste trabalho (maior coeficiente de correlação, r).

### Conclusão

Foram desenvolvidos modelos de desempenho estatísticos obtidos por meio de análise de variância

(ANOVA) de dados coletados em levantamento realizado em 1995 na malha rodoviária do Estado do Paraná (região do Basalto). Os modelos para previsão da evolução, ao longo do tempo, da irregularidade longitudinal e da deflexão mostraram-se significativos, como atestam os valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), dos coeficientes de correlação ( $r$ ) e a distribuição dos valores resíduais.

Os modelos desenvolvidos neste trabalho foram comparados com modelos de desempenho empíricos, desenvolvidos por pesquisadores e organismos rodoviários nacionais e estrangeiros, e apresentaram melhor correlação entre valores observados e previstos, o que evidencia a possibilidade do desenvolvimento de modelos de desempenho, indispensáveis para a gerência de pavimentos, tendo-se apenas dados coletados por um curto período de tempo.

## Referências

- ASHTO. *AASHTO guide for design of pavement structures*. Washington, D.C. American Association of State Highway and Transportation Officials, 1986.
- ATLAS GEOGRÁFICO DO ESTADO DO PARANÁ. Curitiba: Secretaria da Agricultura e do Abastecimento e Instituto de Terras, Cartografia e Florestas, 1983.
- BOX, G.E.P. et al. *Statistical for experiments*. New York: John Wiley, 1978.
- BUTT, A.A. et al. Application of Markov process to pavement management system network level. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANAGING PAVEMENTS, 3., 1987, San Antonio, Texas, Anais... San Antonio: v. 2, 1987. p. 159-172.
- DER-PR. *Parâmetros de Tráfego*. Curitiba: Departamento de Estradas de Rodagem, Secretaria dos Transportes do Estado do Paraná, 1990.
- DER-PR. *Banco de dados do sistema de gerência de pavimentos*. Curitiba: Departamento de Estradas de Rodagem, Secretaria dos Transportes do Estado do Paraná, 1999.
- DNER-ES. 159/85 – Projeto de restauração de pavimentos flexíveis e rígidos. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Ministério dos Transportes, 1985.
- DNER-ES 159/85 - *Tabela de fatores de veículos*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Ministério dos Transportes, 1988.
- FEIGHAN, K.J. et al. A Prioritization scheme for the micro PAVER pavement management. *Transp. Res. Rec.*, Washington, D.C., n. 1215, p. 89-100, 1989.
- GEIPOT. *Pesquisa sobre o inter-relacionamento dos custos de construção, conservação e utilização de rodovias*. Brasília: Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes, Ministério dos Transportes, 1981.
- HAAS, R. et al. *Modern pavement management*. Florida: Krieger Publishing, 1994.
- IAPAR. *Dados Climáticos das regiões do Paraná*. Londrina: Instituto Agronômico do Paraná, 2002.
- JOHN, P.W. M. *Statistical design and analysis of experiment*. New York: Mac Millan, 1971.
- MARCON, A.F. *Contribuição ao desenvolvimento de um sistema de gerência de pavimentos para a malha rodoviária estadual de Santa Catarina*. 1996. Tese (Doutorado)-Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 1996.
- MONTGOMERY, D.C. *Design and analysis of experiments*. New York: John Wiley, 1991.
- PATERSON, W.D.O. (1987). *Road deterioration and maintenance effects – models for planning and management*. The World Bank. Baltimore: The John Hopkins University Press, 1987.
- QUEIROZ, C.A.V. *Performance prediction models for pavement management in Brazil*. 1981. Dissertation (for Degree of Doctor of Philosophy)-The University of Texas at Austin, Texas, Austin, 1981.
- SCHERER, W.T.; GLAGOLA D.M. Markovian models for bridge maintenance management. *J. Transp. Eng.*, New York, v. 120, n. 1, p. 37-51, 1994.
- WANG, K.C.P. et al. Analysis of Arizona Department of Transportation's new pavement network optimization. *Transp. Res. Rec.*, Washington, D.C., n. 1455, p. 91-100, 1994.

Received on September 02, 2005.

Accepted on December 17, 2005.