

MODELOS ESTATÍSTICOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO PARA PAVIMENTOS EM TSD NO NORDESTE DO BRASIL

Fernando Silva Albuquerque

Washington Peres Núñez

José Afonso Gonçalves de Macedo

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Universidade Federal de Campina Grande

RESUMO

O desempenho de pavimentos asfálticos é influenciado, basicamente, pela ação do clima na área, pela capacidade estrutural das camadas do pavimento, pela idade do pavimento e pela ação de cargas de tráfego. De acordo com esse princípio, foram constituídos Modelos de Previsão de Desempenho a partir de dados de levantamentos de Deflexão com FWD (D_{FWD}), de Deflexão com Viga Benkelman (D_{VB}) e Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI) para pavimentos em Tratamento Superficial dos estados do Ceará e Paraíba. O clima foi considerado pelo Índice de Aridez desenvolvida pela UNESCO e a capacidade estrutural do pavimento foi expresso pelo Número Estrutural Corrigido (SNC). Já a idade do pavimento e as cargas de tráfego foram expressas em termos de Número Acumulado de Repetições do Eixo Padrão (N_F). Todos os modelos foram construídos através de Regressão por Crescimento Exponencial e apresentaram boa aplicabilidade para Gerência de Pavimentos na Região Nordeste.

ABSTRACT

Asphalt pavements performance is basically affected by regional climate, bearing capacity of pavement layers, pavement age and traffic loads. Those factors were taken into account when developing the Pavement Performance Models presented in this article. Those models may be used to estimate the evolution of Benkelman Beam or FWD deflections and that of the International Roughness Index (IRI), in surface treatment pavements of Ceará and Paraíba states in Northeastern Brazil. The climate was classifying according to UNESCO Aridity Index. Pavement bearing capacity was expressed by its modified structural number (SNC). Pavement age and traffic loads were represented by number of repetitions of the 80 kN equivalent single axle load (N_F). The models, which were developed by exponential growth regression, show good applicability for Pavement Management in states of Brazil Northeast.

1. INTRODUÇÃO

Modelos de Previsão de Desempenho para Pavimentos são a base da aplicação dos conceitos da Gerência de Pavimentos. Quando o comportamento futuro dos pavimentos é conhecido, torna-se possível à realização de análises de estratégias de manutenção de pavimentos e a programação financeira, objetivando otimizar a aplicação de recursos associado a obtenção da melhor qualidade possível para a malha viária.

Muitas pesquisas que objetivaram o desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de pavimentos foram realizadas no Brasil, podendo-se destacar a Pesquisa Sobre Inter-relacionamento dos Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias (PICR), desenvolvido pela extinta Empresa Brasileira de Planejamento de Transporte (GEIPOT), que resultou nos modelos de previsão de desempenho desenvolvidos por Queiroz (1981) e, em parte, Paterson (1987), ambos servindo como ponto de partida para o desenvolvimento do HDM-3 e, posteriormente, HDM-4.

Algumas outras pesquisas merecem destaque, sobretudo porque foram desenvolvidas com o objetivo de elaborar modelos de previsão de desempenho regionalizados, como foram os casos de modelos desenvolvidos por Marcon (1996), para a malha rodoviária do Estado de Santa Catarina, e Yshiba (2003), para o Estado do Paraná.

A grande dificuldade de aplicar modelos de previsão de desempenho “universais”, como é o caso dos modelos do HDM-4, é a dificuldade de calibração destes para as características regionais dos trechos que serão analisados. Isto acaba acarretando em falhas nas previsões de desempenho como relatado por Nascimento (2005), quando afirmou que a progressão do *IRI* para o valor limite é muito mais elevada no modelo do HDM-4 que para os modelos de Marcon (1996) e Yshiba (2003), quando comparando aos valores reais.

Além da necessidade de regionalizar os modelos de previsão de desempenho, nota-se que os modelos mais empregados acabam por desprezar as características climáticas em suas equações. Essas características são determinantes na formação dos solos para a construção de pavimentos e no processo de degradação dos pavimentos existentes ao longo do tempo.

Este trabalho tem por objetivo apresentar e discutir modelos de previsão de desempenho de pavimentos, resultados de uma tese de doutorado em andamento, elaborados para as características climáticas do Nordeste Brasileiro, mais especificamente dos estados do Ceará e Paraíba. Nos modelos levaram-se em consideração variações de sub-climas, de acordo com o Índice de Aridez da UNESCO, e a capacidade estrutural das camadas que constituem os pavimentos, através do Número Estrutural Corrigido (*SNC*). A idade do pavimento e as cargas de tráfego foram expressas através da consideração do Número Acumulado de Repetições do Eixo Padrão (*N_{acum}*). Foram elaborados modelos para pavimentos asfálticos em tratamento superficial, utilizando dados de deflexões medidas com FWD (*D_{FWD}*), deflexões medidas com Viga Benkelman (*D_{VB}*) e irregularidade longitudinal (*IRI*) medida com aparelho tipo resposta.

2. MODELAGEM PARA PREVISÃO DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS

O primeiro passo para a elaboração de modelos de previsão de desempenho é determinar a forma desejada para o modelo. Existem dois tipos de formas de modelos que podem ser elaborados para se prever desempenho de pavimentos. São eles (NHI, 1998; Pedrosa, 2002):

- determinísticos: São modelos matemáticos que determinam os resultados exatamente a partir de condições iniciais. Usam de regressões para fornecer um único valor de um parâmetro (variável dependente) a partir de uma ou mais variáveis (variáveis independentes);
- probabilísticos: Fornecem o alcance de valores de um parâmetro. É baseado em matrizes de transição probabilística que estimam a probabilidade de seções de pavimentos mudarem de uma condição para outra.

Os modelos ainda podem ser subdivididos quanto a sua natureza em (Haas, 1994):

- puramente mecanísticos, que são baseados em parâmetros de respostas estruturais, como tensão, deformação e deflexão;
- mecanístico-empíricos, onde o parâmetro de resposta estrutural é relacionado à deterioração estrutural ou funcional medida, sendo obtida através de equações de regressão;
- empíricos ou de regressão, nos quais parâmetros que representam a condição estrutural ou funcional são relacionadas a um ou mais parâmetros que descrevam a capacidade estrutural do pavimento, as cargas de tráfego, idade, fatores ambientais e suas interações;
- subjetivos, onde a experiência de técnicos é formalizada através de processos de transição, como o de Markov, obtendo-se modelos de desempenho sem uma série histórica de dados.

Nesta pesquisa foram utilizados modelos determinísticos empíricos e elaborados por Regressão por Crescimento Exponencial, utilizando o Método de Estimativa Quase-Newton.

O crescimento exponencial ocorre quando a taxa de crescimento de uma função é sempre proporcional ao seu tamanho atual. Este crescimento segue uma lei exponencial. Isso implica que, crescendo exponencialmente, quanto maior o valor atual, mais rápida será a evolução para o seu estado limite (Hair *et al.*). Isto explica o caso da evolução dos valores de irregularidade e deflexão ao longo do tempo. Quando são atingidos os seus valores considerados limites, mais rápidos serão os seus crescimentos no decorrer do tempo.

O Método Quase-Newton será utilizado para avaliar a função a ser ajustada através da análise de sua inclinação a partir da estimativa de derivadas de primeira e segunda ordem, respectivamente. Esta informação é usada para a função ajustada seguir um trajeto que promova o mínimo desvio entre valores reais e estimados (Hair *et al.*).

A determinação dos fatores que influenciam a deterioração dos pavimentos é etapa determinante para proceder previsão de desempenho. Ainda, a quantificação de cada fator para a inserção em modelos de previsão proporciona uma maior consistência aos mesmos.

O manual do HDM-4 (2000) aponta os seguintes fatores como principais condicionantes na deterioração de pavimentos:

- condições climáticas;
- tráfego;
- histórico de manutenção;
- geometria da rodovia;
- características estruturais do pavimento;
- propriedades dos materiais.

De fato as condições climáticas, o histórico de manutenção, as características das camadas e as cargas do tráfego são os principais fatores que afetam o desempenho de pavimentos. Os três últimos são fáceis de quantificar e são largamente aplicados em modelos de previsão de desempenho, porém a quantificação relativa às condições climáticas acaba sendo esquecida. Este fator influencia na formação pedológica da região, determinando os solos disponíveis para pavimentação, e na degradação dos pavimentos pelas condições de temperatura e umidade disponíveis no meio.

Nas subseções seguintes serão detalhadas formas de quantificar o clima da região estudada, a capacidade estrutural de pavimentos, o histórico de manutenção e as cargas de tráfego para que possam ser utilizados na elaboração de modelos de previsão de desempenho propostos.

3.1. Características climáticas

O clima em que cada Trecho de Pavimento analisado estava inserido foi classificado em duas etapas. A primeira teve por objetivo classificar o ambiente de acordo com a variação de temperatura. A segunda de acordo com a disponibilidade de água no meio.

O Manual do HDM-4 (2000) apresenta uma classificação climática baseada na amplitude térmica de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1: Classificação da temperatura.

Classificação da Temperatura	Descrição	Variação da Temperatura (°C)
Tropical	Temperatura quente com baixas variações	20 até 35
Sub-tropical Quente	Dias com temperaturas altas e noites frescas, estações quente e fria	-5 até 45
Sub-tropical Frio	Dias com temperaturas moderadas, invernos frios	-10 até 30
Temperado Frio	Verão quente, geada superficial no inverno	-20 até 25
Temperado Frio Intenso	Verão frio, camadas profundas de gelo no inverno	-40 até 20

Analisando o Nordeste do Brasil conclui-se que o mesmo está localizado em uma região de clima tropical. Porém apenas isto não é suficiente para realizar uma classificação climática consistente. O Índice de Aridez é capaz de distinguir regiões climáticas de acordo com a disponibilidade de umidade no meio.

Este índice é utilizado oficialmente pela UNESCO no Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas para a realização de Classificação Climática (Middelton et al., 1992).

O Índice de Aridez (IA) é calculado a partir da seguinte equação (Middelton et al., 1992):

$$I_A = 100 \times \frac{P_r}{ET_0} \quad (1)$$

em que P_r : precipitação média (mm) (obtida no site da Embrapa);
 ET_0 : evapotranspiração potencial (mm) (obtida no site da Embrapa).

A classificação do clima através do I_A é apresentada a seguir. Cada tipo de clima foi inserido no modelo através de uma codificação (C) variando de -1,0 até +1,0.

- $I_A < 0,20$ (ÁRIDO e HIPER-ÁRIDO): +1,0
- $0,20 < I_A < 0,50$ (SEMI-ÁRIDO): +0,5
- $0,50 < I_A < 0,65$ (SUB-ÚMIDO SECO): 0
- $0,65 < I_A < 1,00$ (SUB-ÚMIDO ÚMIDO): -0,5
- $I_A > 1,00$ (ÚMIDO): -1,0

O mapa de classificação do clima pelo Índice de Aridez nas áreas de estudo encontra-se na Figura 1.

3.2. Número estrutural corrigido do pavimento

A capacidade estrutura dos pavimentos pode ser interpretada através do chamado Número Estrutural Corrigido (SNC), utilizado para refletir a rigidez da estrutura do pavimento como um todo, considerando componentes que espelham a resistência das camadas (coeficientes estruturais) e suas espessuras, e, para o subleito, o seu Índice de Suporte Califórnia (ISC).

Este parâmetro foi inicialmente proposto como Número Estrutural do pavimento (SN) em pesquisa da NCHRP, e publicado pela primeira vez como *Evaluation of AASHO Interim Guides for Design of Pavement Structures* (Van Til et al., 1972). Este é o método utilizado em uma das etapas de projetos de pavimentos novos do Guia da AASHTO (1993). Posteriormente foi avaliado na Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos Rodoviários (PICR) e estudos do HDM como a medida mais significativa de resistência da estrutura do

pavimento nas relações de previsão de desempenho (DNER-PRO 159/85; HDM-4-a, 2000). Nesta pesquisa o número estrutural deveria ser corrigido através da consideração da deformabilidade do subleito do pavimento, dando origem à expressão Número Estrutural Corrigido (SNC).

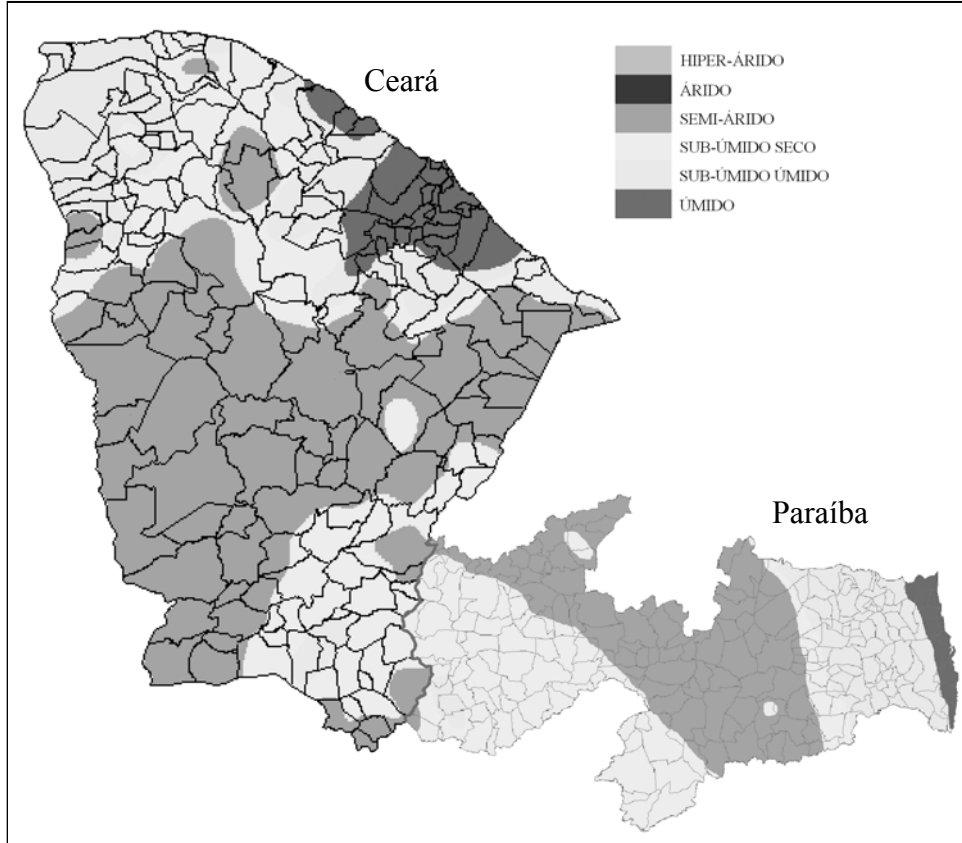


Figura 1: Classificação climática do Ceará e Paraíba (Índice de Aridez).

O SNC é obtido através da seguinte expressão (Paterson, 1987):

$$SNC = \sum a_i \times H_i + 3,51 \log ISC_{SL} - 0,85(\log ISC_{SL})^2 - 1,43 \quad (2)$$

em que a_i : é o coeficiente estrutural da camada i (Ullidtz, 1998; Queiroz, 1981):

- Revestimento: $0,079 \leq a_1 \leq 0,173$, com $a_1 = (0,40 \times \log(E_1/3000) + 0,44)/2,54$ ou $a_1 = 0,181[1 - \exp(-0,000856 \times E_1)]$, sendo E_1 é o módulo de resiliência do revestimento (MPa);
- Bases Granulares: $0,024 \leq a_2 \leq 0,079$, com $a_2 = (0,25 \times \log(E_2/160) + 0,11)/2,54$ ou $a_2 = (11,47CBR_2 - 0,07783CBR_2^2 + 1,772 \times 10^{-4} CBR_2^3) \times 10^{-4}$, sendo E_2 o módulo de resiliência da base (MPa) e ISC_2 o Índice de Suporte Califórnia da base (%);
- Sub-bases Granulares: $0,024 \leq a_2 \leq 0,079$, com $a_3 = (0,23 \times \log(E_2/160) + 0,15)/2,54$ ou $a_3 = 0,00394 + 0,2559 \log ISC_3$, sendo E_3 o módulo de resiliência da sub-base (MPa) e ISC_3 o Índice de Suporte Califórnia da sub-base (%).

H_i : é a espessura da camada i (cm);

ISC_{SL} : é o índice de suporte do subleito (%);

O SNC foi classificado através de códigos (S) em três níveis distintos, conforme apresentado a seguir:

- $SNC > 3,5$: +1,0
- $2,5 < SNC \leq 3,5$: 0
- $SNC \leq 2,5$: -1,0

3.3. Número acumulado de repetições do eixo padrão

O Número Acumulado de Repetições do Eixo Padrão (N_f) está diretamente relacionado à idade do pavimento desde a última intervenção até a avaliação desejada, bem como, e principalmente, às cargas que a configuração do tráfego do trecho analisado repassa ao pavimento.

O método de cálculo do N_f seguiu o adotado pela AASHTO, estando descrito na publicação do DNIT IPR-667/22 (1981) e na pesquisa de Pereira (1992).

O N_f foi classificado através de códigos (N) em três níveis distintos, conforme apresentado a seguir:

- $N_f > 2,0 \times 10^6$: +1,0
- $8,0 \times 10^5 < N_f \leq 2,0 \times 10^6$: 0
- $N_f \leq 8,0 \times 10^5$: -1,0

4. APRESENTAÇÃO DOS MODELOS E ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA

A partir do procedimento adotado, foi possível elaborar Modelos de Previsão de Desempenho Determinísticos por Regressão com Crescimento Exponencial para dados de deflexão, medida com FWD e Viga Benkelman, e de Irregularidade Longitudinal, medido com Equipamento Tipo Resposta. Estes dados foram disponibilizados pelos Órgãos Rodoviários Estaduais da Paraíba e do Ceará.

Os modelos apresentados são para pavimentos construídos em Tratamento Superficial, bastante comum na malha rodoviária do Nordeste do Brasil por constituírem pavimentos com baixo volume de tráfego.

Para os três modelos elaborados foram realizadas análises de consistência a partir do cálculo do coeficiente de determinação (R^2), da Raiz do Erro Médio Quadrático Percentual (REMQP), Análise de Variância (ANOVA) e da análise do Diagrama de Resíduos.

O chamado coeficiente de determinação (R^2) é o quadrado do coeficiente de correlação de Pearson (Spiegel, 1994). É uma medida da proporção da variabilidade no parâmetro de desempenho do modelo que é explicada pela variabilidade dos fatores utilizados no mesmo (C , S e N).

A Raiz do Erro Médio Quadrático Percentual (REMQP) é a raiz quadrada da média das diferenças individuais quadráticas entre a previsão e as observações, descrita percentualmente. O REMQP mede o erro típico da previsão do modelo (Spiegel, 1994).

Análise de Variância (ANOVA) é um teste estatístico que visa verificar se existe uma

diferença significativa entre as médias dos dois grupos de dados (observados x previstos) e se os fatores (C , S e N) exercem influência no modelo.

A distribuição F é utilizada pela ANOVA na decisão de aceitar ou rejeitar a hipótese de igualdade entre os dois grupos de dados (hipótese nula). A ANOVA basicamente divide a variabilidade em variabilidade *Entre Grupos* e variabilidade *Dentro de Grupos*, e compara as duas. O objetivo é obter o valor de $F_{\text{observado}}$ dado pela relação entre a Variância *Entre Grupos* e a Variância *Dentro de Grupos*. Se $F_{\text{observado}}$ for menor que o $F_{\text{crítico}}$ para um dado nível de significância α (utilizado $\alpha = 5\%$), então a hipótese nula é aceita. Ainda, na análise de igualdade dos dois grupos de dados, o $p\text{-value}$ deve ser “maior” que α (Spiegel, 1994).

Para analisar se os fatores (C , S e N) exercem influência no modelo o $p\text{-level}$ de um determinado fator do modelo deve ser “menor” que α (Hair *et al.*).

O Diagrama de Resíduos possibilita avaliar graficamente os desvios percentuais entre os valores observados e previstos.

Os os modelos e resultados das análises de consistência são apresentados nas subseções seguintes.

4.1. Modelo de previsão de desempenho para deflexão com FWD

O modelo de previsão de desempenho resultante da deflexão com FWD para pavimentos em tratamento superficial é o seguinte (Banco de Dados Ceará):

$$D_{FWD} = -1041,17 + \exp(6,9935 + 0,005063 \cdot C - 0,01349 \cdot S + 0,006726 \cdot N) \quad (3)$$

em que $S = \frac{SNC - 3}{1,6};$

$$N = \frac{N_f - 1,14 \times 10^6}{1,14 \times 10^6};$$

C : código utilizado para a classificação climática do trecho analisado (ver 3.1);

N_f : número de repetições acumulado do eixo padrão de 8,2t (método AASHTO);

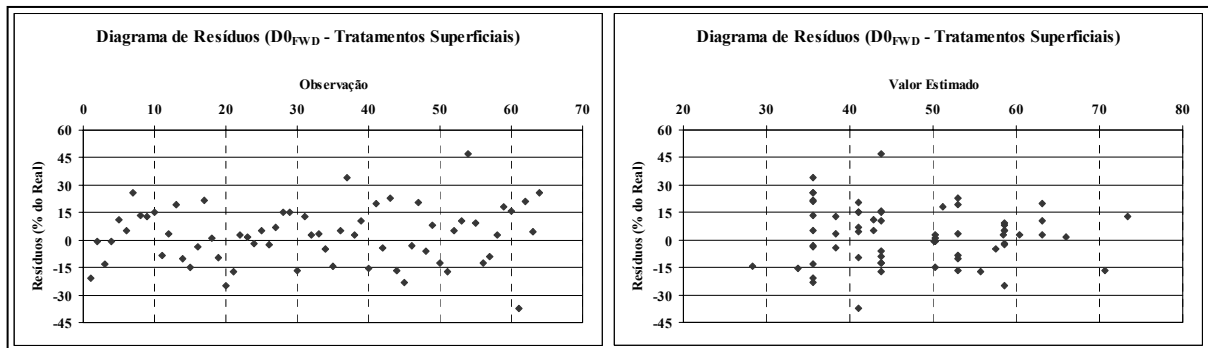
SNC : número estrutural corrigido, calculado pelo método de Paterson (1987).

Os valores estatísticos de análise de consistência, para o modelo de previsão de deflexão com FWD, são apresentados na Tabela 2. A análise de resíduos é apresentada na Figura 2.

De acordo com os resultados das análises estatísticas conclui-se que o R^2 apresentou valor elevado ($R^2 > 0,5$) para modelos de previsão de desempenho em nível de rede e o REMQP ficou dentro do limite estabelecido ($REMQP < 20\%$). Quanto à ANOVA, confirmou-se a teoria de que os dados observados e previstos pelo modelo fazem parte de uma mesma população ($F_{\text{observado}} < F_{\text{crítico}}$ e $p\text{-value} > 0,05$). Todos os coeficientes do modelo tiveram o valor do $p\text{-level}$ menor que 0,05, significando que todos têm forte influência na previsão de D_{FWD} . Os diagramas de dispersão confirmam a média dos erros próxima a zero e que os erros percentuais são maiores para os valores estimados menores.

Tabela 2: Análise de Consistência do Modelo de Previsão de Deflexão com FWD.

R-quadrado			REMQP			
0,67			15,63 %			
Anova: Fator Único						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>		<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
Do observado	64		3031,484	47,36694	161,1804	
Do previsto	64		3032,615	47,38461	107,7706	
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F_{observado}</i>	<i>p-value</i>	<i>F_{crítico}</i>
Entre grupos	0,009992	1	0,009992	7,43E-05	0,993136	3,916327
Dentro dos grupos	16943,91	126	134,4755			
Total	16943,92	127				
Análise de Influência de Coeficientes (<i>a, b, c, d, e</i>)						
<i>Coeficientes</i>	<i>a</i>	+ EXP (<i>b</i>	+ <i>c</i> · <i>C</i>	+ <i>d</i> · <i>S</i>	+ <i>e</i> · <i>N</i>)	
<i>p-level</i>	≅ 0	≅ 0	0,00078	≅ 0	0,000002	

**Figura 2:** Diagramas de Resíduos por observação e por valor estimado (D_{FWD}).**4.2. Modelo de previsão de desempenho para deflexão com viga Benkelman**

O modelo de previsão de desempenho resultante da deflexão com Viga Benkelman (VB) para pavimentos em tratamento superficial é o seguinte (Banco de Dados Paraíba):

$$D_{FWD} = -1,39775 + \exp(3,955109 + 0,091079 \cdot C - 0,04641 \cdot S + 0,210858 \cdot N) \quad (4)$$

Os valores estatísticos de análise de consistência, para o modelo de previsão de deflexão com VB, são apresentados na Tabela 3. A análise de resíduos é apresentada na Figura 3.

Tabela 3: Análise de Consistência do Modelo de Previsão de Deflexão com VB.

R-quadrado			REMQP		
0,65			12,44 %		
Anova: Fator Único					
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
Do observado	85	4322	50,84706	105,893	
Do previsto	85	4322,004	50,84711	68,5581	
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F_{observado}</i>	<i>p-value</i>
Entre grupos	1,14E-07	1	1,14E-07	1,31E-09	0,999971
Dentro dos grupos	14653,9	168	87,22557		3,897412
Total	14653,9	169			
Análise de Influência de Coeficientes (<i>a, b, c, d, e</i>)					
<i>Coeficientes</i>	<i>a</i>	+ EXP (<i>b</i>	+ <i>c</i> · <i>C</i>	+ <i>d</i> · <i>S</i>	+ <i>e</i> · <i>N</i>)
<i>p-level</i>	0.95975	≅ 0	0.076049	0.15520	0.084263

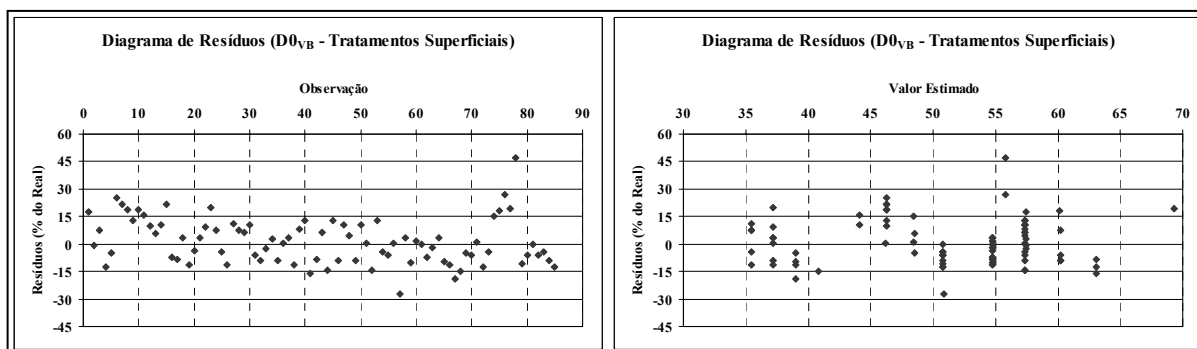


Figura 3: Diagramas de Resíduos por observação e por valor estimado (D_{VB}).

De acordo com os resultados das análises estatísticas conclui-se que o R^2 apresentou valor elevado ($R^2 > 0,5$) para modelos de previsão de desempenho em nível de rede e o REMQP ficou dentro do limite estabelecido ($REMQP < 20\%$). Quanto à ANOVA, confirmou-se a teoria de que os dados observados e previstos pelo modelo fazem parte de uma mesma população ($F_{observado} < F_{crítico}$ e $p\text{-value} > 0,05$). Apenas o coeficiente b do modelo teve o valor do $p\text{-level}$ menor que 0,05. Os coeficientes de C (c) e N (e) tiveram valor de $p\text{-level}$ bem próximos a 0,05, indicando que estes parâmetros exercem uma certa influência no modelo. Para os coeficientes a e d (S), o $p\text{-level}$ foi muito acima de 0,05, concluindo-se a baixa influência destes parâmetros nos resultados do modelo de D_{VB} . Os diagramas de dispersão confirmam a média dos erros próxima a zero e que os erros percentuais são maiores para os valores estimados maiores.

4.3. Modelo de previsão de desempenho para irregularidade longitudinal

O modelo de previsão de desempenho resultante do Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI) para pavimentos em tratamento superficial é o seguinte (Banco de Dados Ceará):

$$IRI = 3,31663 + \exp(-0,69160 - 0,18754 \cdot C - 1,15811 \cdot S + 0,837915 \cdot N) \quad (5)$$

Os valores estatísticos de análise de consistência, para o modelo de previsão de IRI , são apresentados na Tabela 4. A análise de resíduos é apresentada na Figura 4.

Tabela 4: Análise de Consistência do Modelo de Previsão de Irregularidade.

Tabela 10 - Análise de Consistência do Modelo de Previsão de Irregularidade:						
R-quadrado			REMQP			
0,80			7,73 %			
Anova: Fator Único						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Do observado	37	144,4962	3,905301	0,510052		
Do previsto	37	144,4962	3,905303	0,408494		
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F _{observado}	p-value	F _{crítico}
Entre grupos	2,16E-11	1	2,16E-11	4,7E-11	0,999995	3,973895
Dentro dos grupos	33,06765	72	0,459273			
Total	33,06765	73				
Análise de Influência de Coeficientes (a, b, c, d, e)						
Coeficientes	a	+ EXP (b	+ c · C	+ d · S	+ e · N)	
p-level	≅ 0	0,14784	0,21500	0,00260	0,000022	

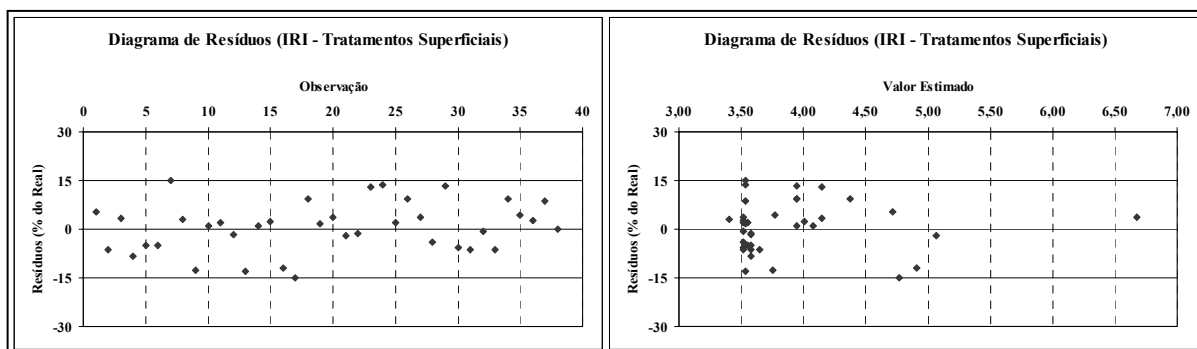


Figura 4: Diagramas de Resíduos por observação e por valor estimado (*IRI*).

De acordo com os resultados das análises estatísticas conclui-se que o R^2 apresentou valor elevado ($R^2 > 0,5$) para modelos de previsão de desempenho em nível de rede e o REMQP ficou dentro do limite estabelecido ($REMPQ < 20\%$). Quanto à ANOVA, confirmou-se a teoria de que os dados observados e previstos pelo modelo fazem parte de uma mesma população ($F_{observado} < F_{critico}$ e $p-value > 0,05$). Os coeficientes a , d (S) e e (N) do modelo tiveram os valores do $p-level$ menores que 0,05, indicando que têm grande influência no modelo. Os coeficientes b e c (C) tiveram valor de $p-level$ bem acima de 0,05, concluindo-se a baixa influência destes parâmetros nos resultados do modelo de *IRI*. Os diagramas de dispersão confirmam a média dos erros próxima a zero e que os erros percentuais são maiores para os valores estimados menores.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos de previsão de desempenho estruturados a partir da utilização de variáveis como clima (classificado a partir do Índice de Aridez), capacidade estrutural do pavimento (Número Estrutural Corrigido) e a idade aliada às cargas de tráfego (expressos como Número Acumulado de Repetições do Eixo Padrão) propiciaram uma boa performance, confirmada através de métodos estatísticos de análise de consistência. Contudo, devem-se destacar os modelos propostos para D_{FWD} e *IRI*, pela maior significância dos seus coeficientes.

A proposição de modelos de previsão de desempenho utilizando variáveis codificadas com mais de dois níveis proporcionou a utilização do método de regressão por crescimento exponencial, que teoricamente é a mais apropriada para simular a evolução de desempenho de deflexão e irregularidade.

Vale salientar que as boas performances dos modelos de desempenho propostos limitam-se às condições de contorno impostas, as quais são pavimentos em tratamento superficial e localizados em regiões essencialmente de clima tropical.

Em continuidade a esta tese de doutorado, a próxima etapa da pesquisa será a elaboração de modelos de previsão de desempenho para pavimentos em misturas asfálticas utilizando dados dos mesmos casos de estudo.

Agradecimentos

Ao Departamento de Estradas de Rodagem do Estado da Paraíba (DER-PB) e ao Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes do Estado do Ceará (DERT-CE) pela concessão dos dados para a execução desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DCC/USA.
- DNER-PRO 159/85. *Projeto de restauração de pavimentos flexíveis e semi-rígidos*. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1985.
- Haas, R. C. G., Hudson W. R., Zaniewski J. P. *Modern pavement management*. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida, 1994.
- Hair, J.F.; Anderson, R.E.; Tathan, R.L.; Black, W. O. *Análise Multivariada de Dados*. Traduzido por Adonai Schlup Sant’ana e Anselmo Chaves Neto – 5ª ed. – Porto Alegre: Bookman, 2005.
- HDM-4. (2000) *Volume 4 – Analytical framework & model descriptions: Part C – road deterioration models*. International Study of Highway Development and Management Tools (ISOHDM), The World Bank, Washington, USA.
- IPR-667/22. *Método de projeto de pavimentos flexíveis*. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1981.
- Marcon, A. F. (1996) *Contribuição ao desenvolvimento de um sistema de gerência de pavimentos para a malha rodoviária estadual de Santa Catarina*. Tese (Doutorado em Infra-Estrutura Aeronáutica), Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos – SP, Brasil.
- Middelton, N. and Thomas, D.S.G. (1992). *World Atlas of Desertification*. United Nations Environment Program, Edward Arnold, London, 69 pp.
- Nascimento, D. M. (2005) *Análise comparativa de modelos de previsão de desempenho de pavimentos flexíveis*. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Transportes) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível na Web em: <http://www.teses.usp.br>. Consultado em Maio de 2006.
- NHI. (1998) *Pavement management systems*. Federal Highway Administration, National Highway Institute Course, 422 p, NHI Course nº 131035. Disponível na Web em: <http://www.nhi.fhwa.dot.gov>. Consultado em Janeiro de 2006.
- Paterson, W. D.O. (1987) *Road deterioration and maintenance effects*. World Bank Publications, Washington-DC, USA. Disponível na Web em: <http://www.worldbank.org>. Consultado em Maio de 2006.
- Pedrosa, A. B dos S. O. (2002) *Calibração de modelos de previsão de desempenho da AASHTO com base na pesquisa FHWA-LTPP*. Dissertação (Mestrado em Infra-Estrutura Aeronáutica), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos – SP, Brasil.
- Pereira, D. R. Al-Chueyr M. (1992) *Contribuição ao estudo dos fatores de equivalência de cargas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia). EPUSP, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Queiroz, C. A. V. (1981) *Performance prediction models for pavement management in Brazil*. 317 p. Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy, University of Texas, Austin-Texas, USA.
- Spiegel, M. R. (1994). *Estatística*, Schaum McGraw-Hill, 3ª Edição.
- Ullidtz, Per (1998). *Modelling Flexible Pavement Response and Performance*, Polyteknisk Forlag.
- Van Til, C. J., B. F. Mccullough, B. A. Vallerger, and R. G. Hicks (1972). NCHRP Report. 128: *Evaluation of AASHO Interim Guides for Design of Pavement Structures*, HRB, National Research Council, Washington, D.C.
- 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 – SP.

Fernando Silva Albuquerque (albuquerque.f.s@uol.com.br)

Washington Peres Núñez (wpnunez@cpgec.ufgrs.br)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Osvaldo Aranha, 99 – 3º Andar – CEP 90035-190 – POA – RS – BRASIL

José Afonso Gonçalves de Macedo (afonso@geotecnia.ufcg.edu.br)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande.