

MODELOS PROBABILÍSTICOS PARA PREVISÃO DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS DA MALHA RODOVIÁRIA PARANAENSE

José Kiysha Yshiba

Departamento de Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá

José Leomar Fernandes Junior

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

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de pavimentos, utilizando-se o método probabilístico, com base no estabelecimento de matrizes de probabilidades de transição, obtidas através do processo de Markov. As matrizes foram estabelecidas tendo por base opiniões de especialistas formalizada pelo método de Delfos. Os especialistas avaliaram seções de pavimentos da malha rodoviária da região de basalto do Estado do Paraná, a partir do estado atual da seção e por um determinado período de tempo. As curvas obtidas nos modelos probabilísticos retratam a evolução da deterioração ao longo do tempo, desde a construção até o final de vida útil, o que permite analisar diferentes estratégias de intervenção, a indicação das datas de realização das atividades de manutenção e reabilitação dos pavimentos existentes, com base na condição do pavimento.

1. INTRODUÇÃO

Os pavimentos se deterioram ao longo do tempo em razão das solicitações do tráfego e dos fatores climáticos. Como os recursos de manutenção e reabilitação de pavimentos sempre são insuficientes para atender às reais necessidades, torna-se necessário que os recursos sejam utilizados de forma mais eficiente possível. Para isso, as intervenções de manutenção e reabilitação devem ser planejadas, buscando-se as otimizações, o que permitirá, de forma sistemática, o estabelecimento de prioridades na aplicação dos recursos.

Os Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGP) surgem como uma ferramenta capaz de auxiliar os organismos rodoviários na tomada de decisões. A gerência de pavimentos visa dar apoio aos organismos rodoviários quando da tomada de decisão sobre atividades de manutenção, reparo, reabilitação e reconstrução (Haas et al., 1994).

A tomada de decisão em gerência de pavimentos depende, sobretudo, 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.

Nos modelos probabilísticos, utilizam-se opiniões de engenheiros e técnicos, as quais são formalizadas através de processos de transição, como o processo de Markov, que permitem a estimativa da condição futura do pavimento com base no conhecimento da condição atual, através de uma matriz de probabilidade de transição. A matriz de probabilidade de transição é desenvolvida a partir de avaliações subjetivas, por especialistas que fazem previsões sobre a evolução da deterioração dos pavimentos a partir de uma determinada condição atual e por um dado período de tempo. É possível, também, estabelecer atividades de manutenção e reabilitação mais indicada para os pavimentos existentes, utilizando esse procedimento.

No presente trabalho, foram desenvolvidos modelos de desempenho probabilísticos com base nas avaliações subjetivas realizadas nos pavimentos da região de basalto do Estado do Paraná. As avaliações foram feitas por engenheiros do DER-PR que, a partir da sua condição atual do pavimento e por um período de tempo, pode-se desenvolver matrizes de probabilidade de transição utilizando-se o processo de Markov.

2. MODELOS PROBABILÍSTICOS

Para o desenvolvimento dos modelos de desempenho probabilísticos, utiliza-se o processo de Markov, que se baseia na determinação de vetor estado e no estabelecimento de matrizes de probabilidades de transição para cada seção de pavimento.

2.1. Processo Markov

O processo de Markov descreve o desenvolvimento de um evento como sendo um processo estocástico. Consiste de um conjunto de objetos e um conjunto de estados, tal que a qualquer tempo cada objeto deve estar em um estado e a transição entre os estados do processo só depende do estado atual do processo, não importando por quais estados anteriores o processo já passou ou irá passar. Não são desconsideradas as informações passadas do processo. É como se todas estivessem representadas nas condições do presente. A probabilidade de um processo passar de um estado para outro é chamada probabilidade de transição. Estado indica a situação do processo num certo instante, a qual é aferida por uma variável ou conjunto de variáveis. Transição é a evolução de um instante para outro, podendo haver mudanças de estado ou não.

Em 1980, o Departamento de Transporte do Estado de Arizona (EUA) utilizou o processo de Markov para previsão de desempenho dos pavimentos ao longo do tempo (Wang et al., 1994). Posteriormente, inúmeros organismos rodoviários também implementaram modelos de previsão de desempenho com base no processo de Markov: sistema de gerência *PAVER* (Feighan et al., 1989); na Arábia Saudita (Harper et al., 1991); gerência de manutenção de pontes, no Estado de Virginia (Scherer & Glagola, 1994); sistema de gerência de pavimentos Micro-Paver (Butt et al., 1987).

Para a determinação dos vetores estado, o estado do pavimento deve ser definido pelo Índice de Condição do Pavimento (ICP) ou por outros índices de defeitos combinados. No caso do ICP, a escala varia de 0 a 100 e pode ser dividida em 10 estados de condições iguais. No presente trabalho, essa divisão se deu em 20 estados iguais, o que resulta em matriz de probabilidades de transição composta de 20 linhas e 20 colunas. Esse procedimento foi tomado, em razão da avançada idade das seções de pavimentos analisada.

Um vetor estado indica a probabilidade de uma seção de pavimento estar em cada um dos estados em um ciclo de solicitação, conforme apresentado na Figura 1 (Butt et al., 1987). Na idade 0 (ciclo de solicitação 0), o vetor estado é (1,0,0,0,0,0,0,0,0,0), o que significa que há uma probabilidade igual a 1 de a seção de o pavimento estar no estado 1 no ciclo de solicitação 0. Ou, em outras palavras, significa que o ICP fica entre 90 e 100 logo após a construção.

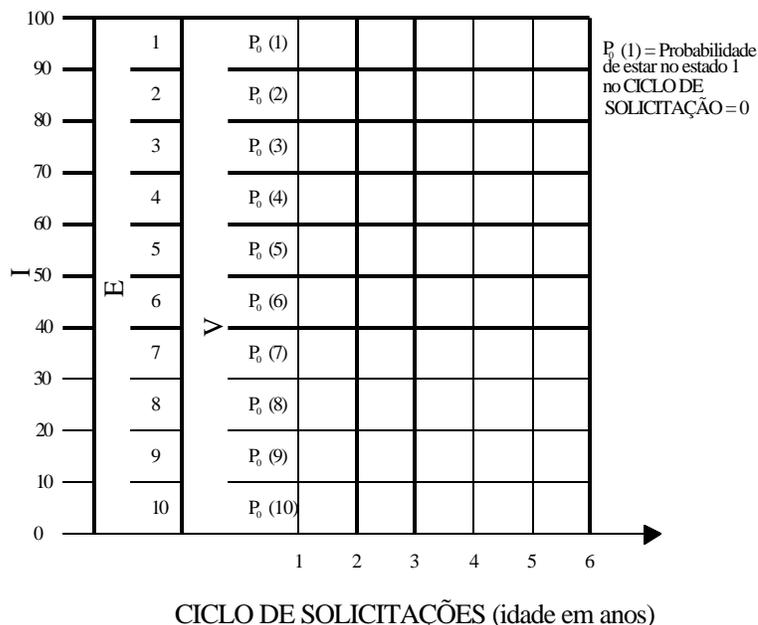


Figura 1: Representação esquemática de estado, vetor estado e ciclo de solicitação (Butt et al., 1987).

O desenvolvimento de uma matriz de probabilidades de transição tem por objetivo estabelecer a taxa de deterioração do pavimento com o tempo. Com a hipótese de que a condição do pavimento ou permanece no seu estado atual ou passa ao próximo estado de condição inferior durante um ciclo de solicitação, a matriz de probabilidades de transição tem a forma da equação 1.

$$P = \begin{pmatrix} p(1) & q(1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p(2) & q(2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p(3) & q(3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p(4) & q(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p(5) & q(5) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p(6) & q(6) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p(7) & q(7) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p(8) & q(8) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p(9) & q(9) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{1}$$

Na equação 1, $p(j)$ é a probabilidade do pavimento permanecer no estado j durante um ciclo de solicitação e $q(j) = 1 - p(j)$ é a probabilidade do pavimento passar para o próximo estado $(j+1)$ durante um ciclo de solicitação.

O vetor estado para qualquer ciclo de solicitação t é obtido pela multiplicação do vetor estado inicial $p(0)$ pela matriz de transição P elevada à potência t , como a equação 2.

$$\begin{aligned}
 p(1) &= p(0) \times P \\
 p(2) &= p(1) \times P = p(0) \times P^2 \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 p(t) &= p(t-1) \times P = p(0) \times P^t
 \end{aligned} \tag{2}$$

Com este procedimento, se as matrizes de transição podem ser estimadas, o estado futuro do pavimento em qualquer de ciclo de solicitação, t , pode ser previsto.

Segundo Wang et al. (1994), as vantagens do método probabilístico compreendem a possibilidade do desenvolvimento de curvas de desempenho de pavimentos sem dados históricos, a calibração direta através do uso de um método formal de entrevistas por especialistas, a projeção além dos limites estabelecidos pelos dados, algo que os modelos de regressão não podem garantir, e a facilidade com que o modelo pode ser integrado ao processo de otimização. A principal desvantagem é a necessidade de desenvolvimento de matrizes para cada combinação de fatores, tais como tipo de pavimento, espessura do pavimento, cargas ou volumes de tráfego, meio ambiente, suporte do subleito. Como consequência, tem-se a necessidade do desenvolvimento de um grande número de matrizes de transição probabilísticas. Para exemplificar, uma aplicação do processo de Markov considerando dois níveis de espessura da camada de revestimento, três níveis de tráfego e dois níveis de capacidade de suporte do subleito resultam em um total de $2 \times 3 \times 2 = 12$ combinações.

2.2. Métodos Formais de Entrevistas

O método de Delfos busca o consenso de especialistas sobre um determinado problema. É um processo que visa a redução da margem de erro numa tomada de decisões. A técnica de Delfos baseia-se no painel de especialistas, nos questionários sobre o problema abordado e nas interações. De acordo com Saito & Sinha (1991), o método de Delfos apresenta três características distintas que o diferenciam dos métodos convencionais de entrevistas:

- a) anonimato: garante que as opiniões de cada membro do grupo sejam expressas através dos questionários, sem que haja conhecimento prévio entre eles;
- b) interação com respostas controladas: é o modo de comunicação entre os membros do grupo;
- c) análise estatística das respostas: mecanismo que permite determinar a variação entre as opiniões dos especialistas através da média, desvio padrão, tamanho da faixa do entrequartil, coeficiente de variação etc.

3. ESTUDO DE CASO

A região de basalto foi escolhida como área de estudo em razão da sua importância sócio-econômica e às condições climáticas que nela predominam. Dentre as cinco regiões do Estado do Paraná, é a que tem a maior área geográfica, com uma superfície equivalente a 42% da área do total do território do Estado (Atlas Geográfico, 1987), com mais de cinco mil e trezentos quilômetros de rodovias pavimentadas, que correspondem a mais de 50% da malha rodoviária estadual, nas quais transitam consideráveis volumes de tráfego (DER-PR, 1996; 1999).

Os especialistas, engenheiros do DER-PR, avaliaram as seções de pavimentos segundo as normas do DNER-PRO 07/94 (DNER, 1994). A avaliação foi feita como se fosse para uma rodovia de tráfego intenso, constituído de veículos comerciais e de passageiros trafegando num veículo de passeio médio a uma velocidade próxima do seu limite permitido (70 a 80 km/h), sob condições climáticas favoráveis. O avaliador considerou apenas o estado atual da superfície, incluindo “buracos”, saliências, irregularidades transversais e longitudinais. Ignorou os aspectos geométricos da seção da rodovia, a resistência à derrapagem e grandes depressões em aterros. Cada seção de pavimento foi classificada segundo os valores atribuídos em escala que varia de 0 (pavimento em péssima condição) a 100 (pavimento em condições muito boas).

As matrizes de probabilidades de transição podem ser determinadas diretamente com a utilização de dados de desempenho das seções de pavimentos, submetidas a diferentes atividades de manutenção e reabilitação por um longo tempo. Como o DER-PR não dispõe esses dados, as matrizes de probabilidades de transição foram estimadas segundo a opinião de especialistas através do método de Delfos, capazes de prever a maneira com que o pavimento se comporta com o tempo, bem como estimar as necessidades futuras.

O formulário utilizado para avaliação dos pavimentos é apresentado pela Figura 2. A Tabela 1 mostra a correspondência entre a escala do ICP com os conceitos de condição do pavimento, que vão do muito ruim ao muito bom.

AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DA SEÇÃO DE PAVIMENTOS	
Seção:	
Extensão:	
Idade:	VDM:
Avaliador:	Data: / /
ICP p/ 2002:	É satisfatório: Sim () Não ()
ICP prevista p/ 2003:	ICP prevista p/ 2005:
ICP prevista p/ 2004:	ICP prevista p/ 2006:
ATIVIDADES DE MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO (M&R)	
Para 2002: Sim () Não () Tipo de M & R: Se for não, quando? ()	
Para 2007: Sim () Não () Tipo de M & R:	

Figura 2: Formulário para avaliação da condição dos pavimentos.

Tabela 1: Escala de avaliação do ICP

ÍNDICE DE CONDIÇÃO DOS PAVIMENTOS	
CONCEITO	ESCALA
Muito bom	100 – 80
Bom	80 – 60
Regular	60 – 40
Ruim	40 – 20
Muito ruim	20 – 0

A Tabela 2 apresenta resultados obtidos através de opiniões formalizadas por especialistas, que analisaram as 29 seções de pavimentos estabelecidas na programação fatorial das seções com características homogêneas, em termos de idade, estrutura, subleito e tráfego (YSHIBA, 2003).

Tabela 2: Resultado da avaliação subjetiva das seções de pavimentos não reabilitadas.

ORDEM	SEÇÃO	ÍNDICE DE CONDIÇÃO DOS PAVIMENTOS (ICP)					
		ANO					
		2002	2003	2004	2005	2006	2007
1	163S0110	55	52	48	40	35	30
2	566S0020	55	52	48	45	42	40
3	488S0030	55	50	45	40	35	30
4	488S0050	53	50	45	43	40	35
5	90S0290	68	65	60	55	50	45
6	90S0310	60	55	50	48	45	40
7	90S0330	58	56	53	50	47	44
8	160S0150	78	74	72	70	65	62
9	170S0180	85	85	80	75	70	70
10	170S0200	80	80	75	75	70	65
11	170S0170	60	55	50	45	40	35
12	462S0030	65	63	60	57	55	50
13	462S0050	64	60	55	53	50	47
14	160S0050	58	54	50	44	40	35
15	160S0070	60	54	50	45	40	35
16	160S0090	62	55	53	48	44	40
17	160S0190	80	80	77	72	70	60
18	443S0050	78	75	72	70	68	65
19	163S0130	60	57	55	50	45	40
20	456S0010	80	80	78	75	73	70
21	456S0030	80	80	78	75	73	70
22	323S0070	55	50	45	40	35	30
23	445S0020	55	52	48	44	40	35
24	445S0030	55	50	48	45	40	35
25	323S0170	55	50	45	40	35	30
26	444D0031	80	80	75	75	70	70
27	460S0010	50	45	40	35	30	25
28	487S0195	50	43	35	30	25	20
29	160S0170	80	78	75	72	70	65

Com os valores de ICP da Tabela 2, obtidos através de avaliações subjetivas, foram estimados as matrizes de probabilidades de transição e os vetores estado correspondentes e, conseqüentemente, o desenvolvimento das curvas de previsão de desempenho para as seções analisadas.

4. RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos modelos probabilísticos baseia-se nas curvas de desempenho obtidas a partir das matrizes de probabilidades de transição e dos vetores estado. Os gráficos representam, respectivamente, grupos de seções de pavimentos consideradas homogêneas (estrutura, subleito, tráfego e condições climáticas) correspondentes a cada célula da matriz fatorial (Yshiba, 2004). Cada curva de desempenho inicia no ano de abertura ao tráfego e termina no ano de 2002 ou quando o valor do ICP for igual a 40, condição de ruína, como indica a Tabela 1 ou até cinco anos após a avaliação da condição atual do pavimento. Não são consideradas seções após a reabilitação.

As células da matriz fatorial utilizada para seleção das seções de pavimentos que foram analisadas pelos especialistas do DER-PR tiveram que ser definidas de acordo com os seguintes intervalos:

- Idade: entre 8 e 32 anos;
- Tráfego (N): de 10^3 a 9×10^5 ;
- Número estrutural corrigido (SNC): de 3,2 a 8,0.

Conseqüentemente, em função dos amplos intervalos adotados, dentro de uma mesma célula podem ser obtidas curvas de desempenho significativamente diferentes, sem que isso invalide a sistemática adotada.

4.1. Seções Analisadas

A seguir, são apresentadas seções que foram analisadas com as seguintes características:

a) Idade nova, tráfego baixo e número estrutural baixo

A Figura 3 apresenta as curvas de desempenho das seções de pavimento 163S00110 e 566S0020, obtidas a partir da análise da opinião de especialistas do DER-PR, sintetizadas nas matrizes de probabilidade de transição.

Analisando a Figura 3, verifica-se que a seção 163S0110, apesar de ser um pavimento mais novo, apresenta estado de deterioração avançado e que dentro de três anos, se nada for feito em relação à M&R, poderá atingir o nível mínimo de aceitabilidade (Tabela 1). A diferença de comportamento entre as duas seções se deve, principalmente, ao tráfego, pois o volume da seção 163S0110 é, aproximadamente, sete vezes superior ao que trafega na seção 566S0020.

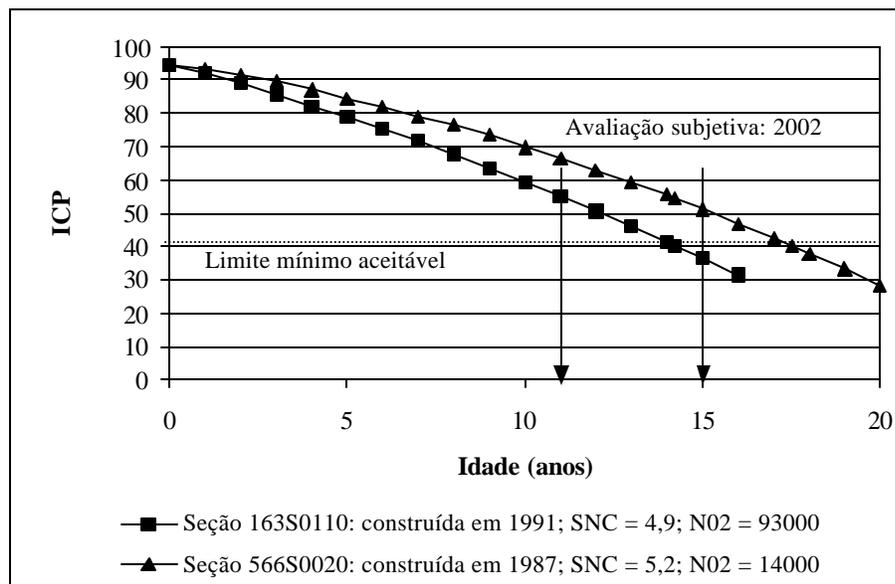


Figura 3: Modelo de desempenho probabilístico: pavimento novo, N baixo e SNC baixo.

b) Idade intermediária, tráfego baixo e número estrutural baixo

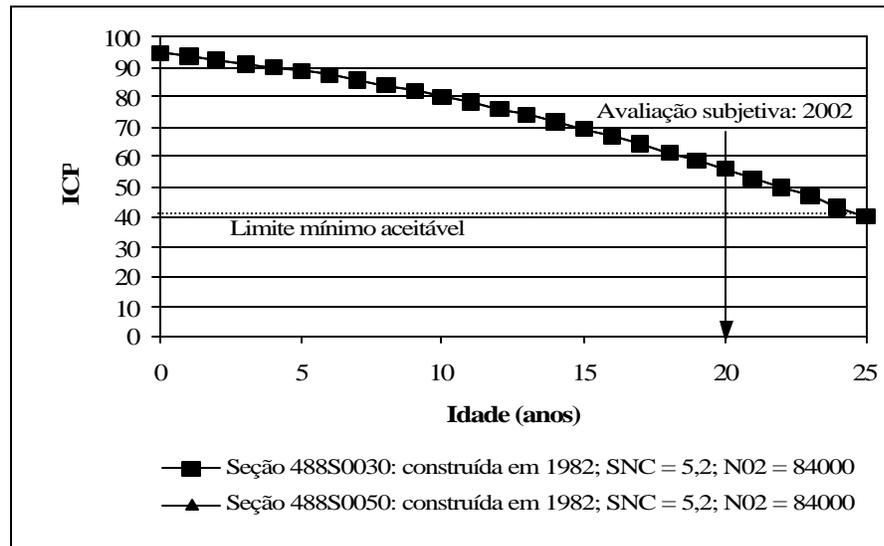


Figura 4: Modelo de desempenho probabilístico: pavimento de idade intermediária, N baixo e SNC baixo.

Analisando a Figura 4, observa-se que as seções apresentam boas condições quando da realização da avaliação, apesar da idade (20 anos). Apresentam, também, comportamento similar quanto à evolução de deterioração ao longo do tempo. A tendência é atingir nível mínimo de aceitabilidade em cinco anos, se nenhuma atividade de M&R for realizada.

c) Idade antiga, tráfego baixo e número estrutural baixo

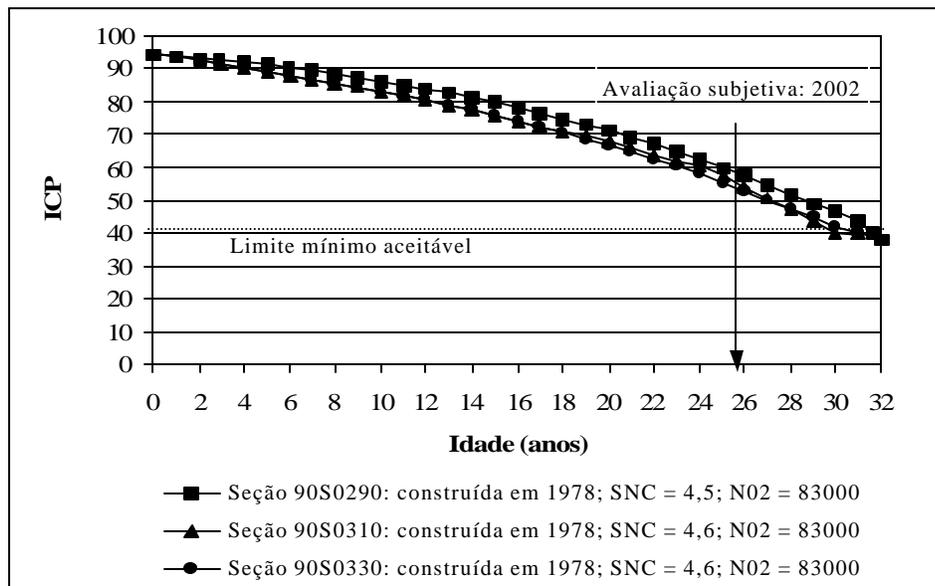


Figura 5: Modelo de desempenho probabilístico: pavimento velho, N baixo e SNC baixo.

Analisando a Figura 5, observa-se que, na condição atual, as três seções de pavimento encontram-se em boas condições. Apresentam, também, comportamento similar quanto à evolução de deterioração ao longo do tempo. Se nada for feito em relação à M&R, podem atingir o nível mínimo de aceitabilidade mínima aos 30 anos de vida.

4.2. Síntese dos Modelos Probabilísticos

A Tabela 3 apresenta uma síntese dos modelos probabilísticos tomando como fator de análise a idade para atingir o nível mínimo de aceitabilidade das seções de pavimentos.

Tabela 3: Síntese dos modelos probabilísticos em relação à idade das seções de pavimentos.

IDADE (pavimento)	TRÁFEGO BAIXO		TRÁFEGO ALTO	
	SN BAIXO	SN ALTO	SN BAIXO	SN ALTO
Novo	(14 - 17) Média = 16	(19 - 29) Média = 24	(19 - 26) Média = 22	(18 - 25) Média = 22
Intermediário	24	(19 - 29) Média = 25	(20 - 29) Média = 25	24
Antigo	31	28	29	40

Observando a Tabela 3, a única tendência existente, considerando os fatores analisados, é que os pavimentos construídos há mais anos apresentam melhor desempenho. Dentre as causas prováveis, podem ser citadas: melhores cuidados construtivos; menores volumes de tráfego nos anos iniciais de vida em serviço; realização de atividades de manutenção das de rotina; maior coibição de sobrecarga.

5. CONCLUSÕES

Foram desenvolvidos modelos de desempenho probabilísticos, mediante o estabelecimento de matrizes de probabilidades de transição (processo de Markov), a partir da opinião de especialistas (engenheiros do DER-PR), utilizando um método formal de entrevistas (método de Delfos).

Este trabalho mostra que é possível o desenvolvimento de modelos de desempenho sem dados históricos de avaliação da condição dos pavimentos ou tendo-se apenas dados coletados por um curto período de tempo, pois foi observada boa evolução da deterioração através dos modelos probabilísticos como prevista por especialistas.

Os modelos probabilísticos desenvolvidos neste trabalho estão consistentes com o desempenho observado, o qual é caracterizado por uma evolução lenta da deterioração. Segundo os dados do inventário, muitas das seções de pavimentos apresentam necessidade de reabilitação após 15 anos de serviço e, às vezes, mais de 20 anos. Esse comportamento pode ser creditado, principalmente, a dois fatores: à estrutura do pavimento e ao baixo volume de tráfego que circula nas seções analisadas. Os casos de deterioração prematura de certas seções de pavimento têm provavelmente como causa principal o fator construtivo e a falta de controle das cargas por eixo.

O modelo probabilístico é capaz de prever o comportamento de deterioração de um pavimento, a partir da liberação ao tráfego até o ano considerado como final da sua vida útil.

Dessa forma, é possível indicar as atividades de M&R e a data mais adequada para a intervenção de uma seção, utilizando-se as curvas de desempenho obtidas através dos modelos probabilísticos, em função da condição do pavimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATLAS GEOGRÁFICO DO ESTADO DO PARANÁ (1987). *Secretaria da Agricultura e do Abastecimento e Instituto de Terras, Cartografia e Florestas*. Curitiba-Pr.
- BUTT, A. A.; SHAHIN, M. Y.; CARPENTER S. H.; CARNAHAN J. V. (1987) "Application of Markov Process to Pavement Management System at Network Level" *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANAGING PAVEMENTS*, 3., San Antonio, Texas, 1994. Anais. Washington, D. C., TRB. v. 2, p. 159-172.
- DER-PR (1996). "Relatório Final do Sistema de Gerência de Pavimentos". *Departamento de Estradas de Rodagem da Secretaria dos Transportes do Estado do Paraná*. Curitiba-Pr.
- _____. (1999). "Base de Dados da Malha Rodoviária do Estado do Paraná". <http://www.pr.gov.br>
- DNER (1994). "DNER-PRO 07-78: Avaliação Subjetiva da Superfície De Pavimentos". *Departamento Nacional de Estradas de Rodagem*. Rio de Janeiro, 6 p.
- FEIGHAN, K. J.; SHAHIN, M. Y.; SINHA, K. C.; WHITE, T. D. (1989). "A Prioritization Scheme for the Micro PAVER Pavement Management". *Transportation Research Record*, n. 1215, p. 89-100.
- HAAS, R.; HUDSON, W. R.; ZANEWSKI, J. (1994). *Modern pavement management*. Krieger Publishing. Malabar, Florida, USA.
- HARPER, W. V.; MAJIDZADEH, K. (1991). Use of expert opinion in two pavement management systems. *Transportation Research Record*, n. 1311, p.242-247.
- YSHIBA, J. K. (2003). "Modelos de Desempenho de Pavimentos: Estudo de Rodovias do Estado do Paraná". *Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo*. São Carlos-SP.
- SAITO, M.; SINHA K. C. (1991). "Delphi Study on Bridge Condition Rating and Effects of Improvements". *Journal of Transportation Engineering*, v.117, n.3, p.320-334.
- SCHERER, W. T.; GLAGOLA D. M. (1994). "Markovian Models for Bridge Maintenance Management". *Journal of Transportation Engineering*, v.120, n. 1, January/February, p. 37-51.
- WANG, K.C. P.; ZANIEWSKI, J.; WAY, G. (1994) "Probabilistic Behavior of Pavement". *Journal of Transportation Engineering*, v. 12, n. 3, may/ june, p.358-375.

José K. Yshiba (jkyshiba@uem.br)

Ocupação: professor adjunto

Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá

Av. Colombo, 5790 CEP: 87020-900 Maringá-Pr

Fone: (44) 261-4322

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

Ocupação: professor associado

Av. Trabalhador São-carlense, 400

Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo