

Desenvolvimento de um modelo de desempenho de irregularidade longitudinal para a rede de rodovias em tratamento superficial duplo do estado da Bahia

Sérgio Pacífico Soncim¹ e José Leomar Fernandes Júnior²

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo de previsão de irregularidade longitudinal para a malha rodoviária, em tratamento superficial duplo, do estado da Bahia. Teve como ponto de partida um planejamento fatorial, elaborado com base em informações de um banco de dados de rodovias, fornecido pelo Departamento de Infraestrutura de Transportes da Bahia (DERBA). Os dados de irregularidade longitudinal foram coletados em 2009, quando foram percorridos aproximadamente 3.000 km de rodovias e executados 650 km de levantamentos. Os fatores considerados foram a idade do pavimento, o tráfego e a pluviometria. Foram utilizadas duas formas de análise estatística dos dados para avaliar a significância dos fatores e definir os parâmetros do modelo de desempenho, a análise exploratória de dados e a análise de variância. O modelo obtido foi comparado com outros modelos de previsão da irregularidade longitudinal e apresentou melhor correlação entre valores observados e previstos, evidenciando a validade de sua utilização em análises de redes viárias constituídas por revestimentos asfálticos em tratamento superficial duplo.

Palavras-chave: pavimentos asfálticos, sistemas de gerência, modelos de desempenho, irregularidade longitudinal.

Abstract: This paper presents the development of a roughness performance prediction model for the State of Bahia highway network built in double surface treatment. Its starting point was a factorial design, created based on information from a roadway database provided by the Departamento de Infraestrutura de Transportes da Bahia (DERBA). The roughness data were collected in 2009, when about 3,000 km of roads were travelled and 650 km of surveys were performed. The factors considered were the pavement age, traffic and rainfall. Two statistical analyses were used to assess the significant factors and define the parameters of the roughness performance model, exploratory data analysis and analysis of variance. The model obtained was compared with other performance prediction models, mainly in terms of roughness, and showed better correlation between observed and predicted values, demonstrating the validity of its use in analysis of road networks built with double surface treatment.

Keywords: asphalt pavements, management systems, performance models, roughness.

1. INTRODUÇÃO

Modelos de previsão da condição do pavimento fazem parte de um Sistema de Gerência de Pavimentos e são utilizados tanto em nível de rede, para planejamento, estimativa das necessidades totais de manutenção e reabilitação, priorização de projetos e programação de investimentos, como em nível de projeto, para a definição de atividades de manutenção e de reabilitação. Falhas no processo de previsão da condição futura do pavimento podem resultar em escolhas de estratégias erradas e, conseqüentemente, em utilização ineficiente de recursos.

A irregularidade longitudinal da superfície do pavimento é considerada o mais importante indicativo de desempenho dos pavimentos, pois afeta diretamente o conforto e a segurança dos usuários da rodovia, além de estar relacionada com os custos operacionais dos veículos. De acordo com Paterson (1987), a irregularidade longitudinal influencia a dinâmica do movimento e, por conseqüência, a estabilidade e o controle dos veículos e o impacto das rodas sobre o pavimento.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo de previsão de desempenho de irregularidade longitudinal para

a rede rodoviária em Tratamento Superficial Duplo (TSD) do estado da Bahia, que é o quinto maior estado do Brasil em extensão territorial, com uma malha rodoviária estadual com mais de 20.000 km de rodovias pavimentadas, e que apresenta regiões com distintos índices de precipitação pluviométrica, relevo e vegetação (da caatinga à mata atlântica, passando pelo cerrado). Para o planejamento do levantamento de dados de irregularidade longitudinal foi desenvolvido um experimento fatorial, com base em informações contidas em um banco de dados de rodovias fornecido pelo Departamento de Infraestrutura de Transportes da Bahia – DERBA, do ano de 2004 e que faz parte dos estudos “Sugestões Técnicas para Implementação do Programa de Restauração e Manutenção Rodoviária, (2005)”. O trabalho de campo foi desenvolvido em 2009, quando, por um período de 15 dias, foram percorridos mais de 3.000 km de rodovias no estado da Bahia e executados 650 km de levantamentos.

2. MODELOS DE PREVISÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

As pesquisas iniciadas na década de 1970 pela Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT, 1981) resultaram na Pesquisa do Interrelacionamento de Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias (PICR). Nessa pesquisa, Queiroz (1981) utilizou dados obtidos da observação de 63 seções de pavimento em serviço, da malha rodoviária compreendida no quadrilátero Brasília, Goiânia, Belo Horizonte e São Paulo, para o desenvolvimento de modelos para estimativa do Quociente de Irregularidade (QI), tendo como variáveis independentes o tráfego

¹ **Sérgio Pacífico Soncim**, Departamento de Transportes, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil. (e-mail: sergiops@ufba.br).

² **José Leomar Fernandes Júnior**, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil. (e-mail: leomar@sc.usp.br).

go, a idade (desde a sua construção inicial ou após um recapeamento), as deflexões recuperáveis e o número estrutural corrigido do pavimento.

Paterson (1987) desenvolveu as equações de desempenho utilizadas no programa computacional HDM-III (*The highway design and maintenance standards model*, Watanada *et al.*, 1987), ferramenta utilizada em planejamento e programação de investimentos e de análise de atividades de manutenção e reabilitação de rodovias. Foi considerada a mesma base empírica utilizada por Queiroz (1981), que incluía grande quantidade de dados observados ao longo do tempo (irregularidade longitudinal, trincas, desgaste, defeitos superficiais, deformações permanentes, atividades de manutenção, tráfego e pluviometria). O modelo para a estimativa do quociente de irregularidade longitudinal desenvolvido por Paterson (1987) é apresentado na Equação 1.

$$QI = \left[QI_0 + 0,725(1 + SNC)^{-4,99} \times YE4 \right] \times e^{0,0153AGE3} \quad (1)$$

$$R^2 = 0,75$$

em que,

- QI*: quociente de irregularidade, em contagens/km;
- QI₀*: quociente de irregularidade inicial, em contagens/km;
- SNC*: número estrutural corrigido;
- YE4*: número de operações do eixo equivalente de 80 kN para o ano de análise, calculado pelo método da AASHTO, em milhões por faixa de tráfego; e
- AGE3*: idade do pavimento desde a construção, reabilitação ou reconstrução, em anos.

Marcon (1996) desenvolveu modelos de previsão de desempenho com base em dados da rede rodoviária do estado de Santa Catarina. Os dados foram coletados em 1990 e referiam-se a deflexões, irregularidades de superfície, defeitos, materiais empregados, espessuras das camadas e tráfego, correspondentes a três regiões em que foi subdividido o estado. O desempenho dos pavimentos foi representado pelas variáveis dependentes quociente de irregularidade, deflexões, Índice de Gravidade Global (IGG), trincamento total e afundamento nas trilhas de roda, tendo como variável independente o intervalo de tempo, em anos, ou o número de operações do eixo padrão de 80 kN. Foram testados cinco tipos de equações (linear, logarítmica, polinomial, exponencial e potencial) por meio de análise de regressão, destacando-se que, ainda assim, foi obtido um baixo valor de R^2 , indicando uma fraca relação entre as variáveis *QI* e *IDADE* (Equação 2).

$$QI = 18,318 + 1,1635 \times IDADE \quad R^2 = 0,29 \quad (2)$$

em que,

- QI*: quociente de irregularidade longitudinal, em contagens/km; e
- IDADE*: idade do pavimento desde a construção, em anos.

Yshiba (2003) desenvolveu modelos estatísticos que representam os efeitos dos fatores idade, tráfego e número estrutural sobre o desempenho de pavimentos, quantificado em termos de irregularidade longitudinal e deflexões. A técnica usada foi a Análise de Variância (ANOVA) aplicada aos dados de levantamentos realizados em 1995 e 1998 na malha rodoviária do estado do Paraná. Os modelos, par-

ticularmente o de irregularidade longitudinal (Equação 3), foram comparados com modelos desenvolvidos por Queiroz (1981) e Paterson (1987).

$$IRI = 2,8 + 0,38 \times I + 0,31 \times N - 0,16 \times SNC + 0,09 \times I \times N - 0,08 \times I \times SNC \quad R^2 = 0,75 \quad (3)$$

em que,

- IRI*: Índice de Irregularidade Longitudinal Internacional em m/km;
- I*: idade do pavimento, desde a construção original ou desde o último recapeamento, em anos;
- N*: tráfego expresso pelo número de solicitações equivalentes do eixo padrão; e
- SNC*: número estrutural corrigido do pavimento.

Benevides (2006) desenvolveu modelos estatísticos baseado em levantamentos realizados em 72 trechos da malha rodoviária pavimentada da região metropolitana de Fortaleza, em 2006. Nos modelos estatísticos foram estabelecidas equações de regressão, utilizando a ANOVA, relacionando a irregularidade longitudinal com os defeitos indicados pelo Levantamento Visual Contínuo (LVC), com os valores do Índice de Condição Pavimento (ICP) dos modelos probabilísticos, com a deflexão e com o número estrutural corrigido, ou seja, sem relacionar com as variáveis independentes normalmente consideradas (idade e/ou tráfego).

Albuquerque (2007) desenvolveu modelos de previsão de desempenho a partir de dados de levantamentos de irregularidade longitudinal em pavimentos com tratamento superficial nos estados do Ceará e da Paraíba. O fator clima foi representado pelo Índice de Aridez (IA), desenvolvido pela UNESCO e que é utilizado para distinguir regiões climáticas de acordo com a disponibilidade de umidade no meio. A capacidade estrutural do pavimento foi expressa pelo número estrutural corrigido e as cargas de tráfego foram expressas em termos de número acumulado de repetições do eixo padrão (Equação 4).

$$IRI = 3,331 + EXP(-0,691 - 0,187 \times C - 1,158 \times S + 0,838 \times N) \quad R^2 = 0,80 \quad (4)$$

em que,

- IRI*: Índice de Irregularidade Longitudinal Internacional em m/km;
- C*: código utilizado para a classificação climática do trecho analisado, variando de -1 para clima úmido a +1 para clima árido;
- S*: número estrutural corrigido do pavimento; e
- N*: tráfego expresso pelo número de solicitações equivalentes do eixo padrão.

3. LEVANTAMENTO DE DADOS DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

O planejamento fatorial do experimento considerou os fatores idade do pavimento (ID), tráfego, representado pelo número de aplicações equivalentes do eixo-padrão desde a sua abertura até o ano de 2009 (TA), e pluviometria (PL). Foram adotados dois níveis para cada fator, obtendo-se um experimento fatorial tipo $2^3 = 8$, não tendo sido possível aumentar o número de níveis para pelo menos três devido à limitação orçamentária para a realização dos levantamen-

tos. Houve réplicas, ou seja, repetições de avaliações em seções de pavimento pertencentes à uma mesma célula de uma matriz fatorial, cujos resultados foram obtidos com os mesmos equipamentos, equipe de campo, procedimentos e espaço de inferência.

Os valores limites dos níveis dos fatores foram escolhidos de maneira que as células do arranjo do experimento fatorial fossem preenchidas com pelo menos duas possibilidades de trechos (ao menos uma réplica) e, ao mesmo tempo, para que houvesse alternativas para a montagem de um roteiro com menor custo. Os níveis dos fatores para a montagem do planejamento fatorial e seleção dos trechos levantados em campo são apresentados a seguir:

- ID – Idade do pavimento, com dois níveis, codificados por id_1 (-1) e id_2 (+1):
 - id_1 : Idade do pavimento ≤ 20 anos; e
 - id_2 : Idade do pavimento > 20 anos.
- TA – número de aplicações equivalentes do eixo padrão, desde a abertura ao tráfego até o ano de 2009, com dois níveis, codificados por ta_1 (-1) e ta_2 (+1):
 - ta_1 : Tráfego $\leq 6,5 \times 10^5$ operações do eixo padrão de 8,2 toneladas; e
 - ta_2 : Tráfego $> 6,5 \times 10^5$ operações do eixo padrão de 8,2 toneladas.
- PL – Pluviometria, com dois níveis, codificados por pl_1 (-1) e pl_2 (+1):
 - pl_1 : Pluviometria ≤ 445 mm/ano; e
 - pl_2 : Pluviometria > 445 mm/ano.

Dessa forma, 295 trechos em tratamento superficial duplo que não haviam sofrido atividades de manutenção e reabilitação e cujas informações estavam disponíveis no banco de dados do DERBA foram distribuídos na matriz do planejamento fatorial. A escolha dos trechos (duas réplicas) em cada uma das células não pôde seguir o critério da alea-

toriedade, pois foi necessário montar um roteiro com trechos preferencialmente sequenciais, para redução de custos. As rodovias que tiveram trechos selecionados para levantamento são apresentadas na Figura 1, onde -1 e +1 indicam os níveis dos fatores analisados no experimento (pluviometria, tráfego e idade do pavimento).

A pesquisa de campo para a coleta de dados complementares de irregularidade longitudinal foi realizada em outubro de 2009 e contou com o apoio da Universidade de São Paulo, da Universidade Federal da Bahia, do DERBA e do CNPq. Durante um período de 15 dias foram percorridos mais de 3.000 km de rodovias dentro do estado da Bahia, no interior e no litoral, passando por diferentes tipos de climas, de vegetação e de relevo.

O roteiro montado para a execução dos levantamentos teve como principal objetivo abranger todos os trechos, conforme o planejamento fatorial, entretanto, alguns trechos não foram executados ou por dificuldade de acesso aos locais dos levantamentos ou pelo motivo de o trecho estar em obras de recuperação. Foram os casos dos trechos 172EBA0045, 420BBA0132-1 e 220EBA0020.

Alguns trechos incluídos no planejamento fatorial para coleta de dados de irregularidade longitudinal apresentam o mesmo código do DERBA (p. ex. o trecho 161EBA0065). Isso ocorre em trechos onde não existem materializações físicas como entroncamentos com outras rodovias estaduais, mas entroncamentos com vias locais, marcos ou divisas que subdividem os trechos em diferentes distâncias. Dessa forma, os trechos foram completamente levantados em sua distância total e depois foram subdivididos em escritório, para a obtenção dos valores de irregularidade longitudinal, por trecho.

Os valores de irregularidade longitudinal obtidos pelos levantamentos nos trechos selecionados são apresentados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente para utilização no desenvolvimento dos modelos e para a validação dos mesmos.

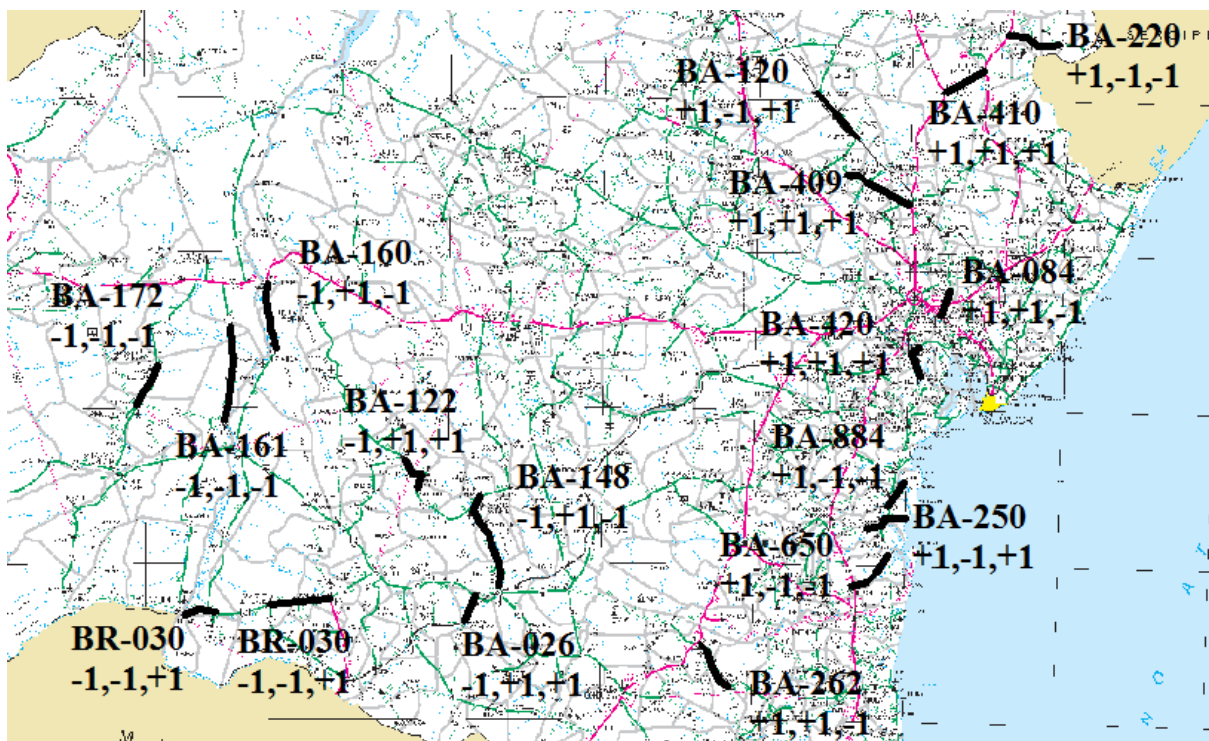


Figura 1. Localização das rodovias que tiveram trechos selecionados para levantamento de irregularidade longitudinal

Tabela 1. Valores da Irregularidade Longitudinal, convertidos para a escala do IRI, obtidos dos levantamentos realizados em campo e utilizados no desenvolvimento dos modelos

<i>Código do DERBA</i>	<i>IRI (m/km)</i>
161EBA0065	3,16
161EBA0070	3,24
030BBA0252	4,03
030BBA0252	3,80
160EBA0060	4,53
160EBA0065	4,17
122BBA0500-2	5,41
026EBA0150	5,03
650EBA0020	3,52
884EBA0005	3,25
120EBA0050	4,39
250EBA0005	4,14
084EBA0020	5,21
262EBA0110	4,80
409EBA0015	7,63
410BBA0010-1	6,57

Tabela 2. Valores da Irregularidade Longitudinal, convertidos para a escala do IRI, obtidos dos levantamentos realizados em campo e utilizados na validação dos modelos

<i>Código do DERBA</i>	<i>IRI (m/km)</i>
161EBA0065	3,43
161EBA0065	3,37
030BBA0250	3,60
030BBA0250	4,11
148EBA0125	4,86
148EBA0130	4,71
148EBA0140	5,01
122BBA0500-2	5,41
026EBA0150	5,02
650EBA0020	4,20
884EBA0005	4,82
120EBA0050	4,29
120EBA0050	4,01
262EBA0115	4,29
262EBA0115	4,88
409EBA0015	5,86
409EBA0015	6,15
410BBA0010-2	5,00

No total foram coletados dados de 16 trechos para o desenvolvimento dos modelos e de 18 trechos para validação.

O equipamento usado para a medição da irregularidade foi um perfilômetro inercial a laser. O equipamento é constituído de um sistema de medição dos perfis longitudinal e transversal de pavimentos rodoviários, que realiza suas medições com o auxílio de medidores de distância (veículo-pavimento), sem contato (a laser), medidores de aceleração vertical do veículo (acelerômetros) e de um sistema de medição de deslocamento e velocidade. O equipamento é gerenciado por um sistema micro processado, que coordena a aquisição dos dados e os envia a um computador portátil.

4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

4.1. Análise exploratória de dados

A Análise Exploratória de Dados (AED) é uma filosofia de análise de dados que emprega uma variedade de técnicas, em sua maioria gráficas, para maximizar a percepção dentro de um grupo de dados, revelar as variáveis mais importantes e tirar conclusões sobre a significância estatística dos fatores (NIST/SEMATECH, 2008). A aplicação das análises gráficas diferencia-se no foco e na sensibilidade, o que pode mostrar diferentes aspectos com relação aos dados e, quando múltiplas técnicas apresentam redundância, há maior confiança quanto à validade e alcance das conclusões.

As técnicas gráficas escolhidas para aplicação neste trabalho foram o Gráfico de Dispersão, o Gráfico de Dispersão das Médias, o Gráfico de Efeitos e o Gráfico de Distribuição de Probabilidade Semi-Normal, todas desenvolvidas a partir das médias aritméticas dos valores das réplicas de cada célula. A matriz fatorial com os resultados dos levantamentos de irregularidade longitudinal dos trechos levantados (Tabela 1) para a realização da AED e desenvolvimento do modelo, já convertidos para a escala do Índice de Irregularidade Longitudinal Internacional (IRI - *International roughness index*), em m/km, é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3. Matriz fatorial com os resultados dos levantamentos de irregularidade longitudinal

	<i>ta₁</i>		<i>ta₂</i>	
	<i>pl₁</i>	<i>pl₂</i>	<i>pl₁</i>	<i>pl₂</i>
id ₁	3,24	3,52	4,53	5,21
Média aritmética	3,16	3,25	4,17	4,80
	4,03	4,39	5,41	7,63
id ₂	3,80	4,14	5,03	6,57
Média aritmética	3,92	4,27	5,22	7,10

O Gráfico de Dispersão (Figura 2) auxilia na determinação dos fatores mais importantes, que são aqueles que acarretam uma variação significativa na dispersão dos valores da variável resposta quando se passa do nível inferior (-) para o nível superior (+), quando comparado ao valor da sua média global (linha tracejada). No eixo vertical aparecem os valores médios das réplicas para a variável resposta, para cada célula da matriz fatorial e para cada um dos fatores, obtidos da Tabela 1, enquanto no eixo horizontal apresentam-se os fatores com seus dois níveis (- e +),

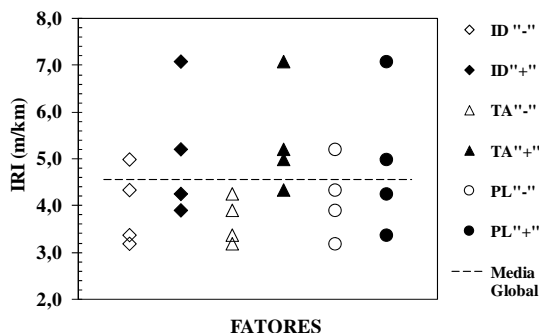


Figura 2. Gráfico de Dispersão dos valores de irregularidade longitudinal

conforme sequência apresentada na legenda da Figura 1. Por exemplo, os valores do IRI para o nível inferior (-) do fator idade do pavimento, apresentados no gráfico em losangos sem preenchimento, são os valores 3,20, 3,39, 4,35 e 5,0, enquanto que os valores de IRI para o nível superior (+), apresentados em losangos com preenchimento, são os valores 3,92, 4,27, 5,22 e 7,10. O mesmo processo é repetido com os valores médios das réplicas para os níveis dos fatores tráfego e pluviometria. Trata-se de uma análise primária dos dados para determinar como a variável resposta se relaciona com os fatores e como os dados mudam em função dos diferentes níveis de um fator.

No Gráfico de Dispersão das Médias (Figura 3), um fator é importante se ele apresenta uma variação significativa na dispersão dos valores médios da variável resposta, quando se passa do nível inferior (-) para o nível superior (+), em comparação com o valor da sua média global. No eixo vertical aparecem os valores médios para a variável resposta, para um dado nível e para cada um dos fatores, obtidos da Tabela 1, enquanto no eixo horizontal apresentam-se os fatores com seus dois níveis (- e +), conforme sequência apresentada na legenda da Figura 2. Por exemplo, o valor do IRI para o nível inferior (-) do fator idade do pavimento, apresentado no gráfico em losango sem preenchimento, é a média dos valores 3,20, 3,39, 4,35 e 5,0, enquanto o valor de IRI para o nível superior (+), em losango com preenchimento, é a média dos valores 3,92, 4,27, 5,22 e 7,10.

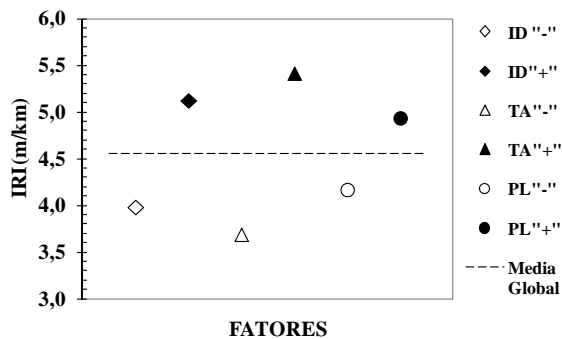


Figura 3. Gráfico de Dispersão dos valores médios dos fatores

O gráfico de Efeitos (Figura 4) auxilia no agrupamento dos fatores e suas interações em duas categorias: importantes e não importantes. No eixo vertical aparecem os valores absolutos dos efeitos estimados para os fatores e suas interações e no eixo horizontal aparece a sequência dos fatores e suas interações, do mais importante ao menos importante. Para experimentos fatoriais 2^k a estimativa dos efeitos (E) utiliza o método dos mínimos quadrados (Equação 5):

$$E = \bar{Y}(+) - \bar{Y}(-) \quad (5)$$

em que,

$\bar{Y}(+)$: valor médio da variável resposta para o nível superior (+); e

$\bar{Y}(-)$: valor médio da variável resposta para o nível inferior (-).

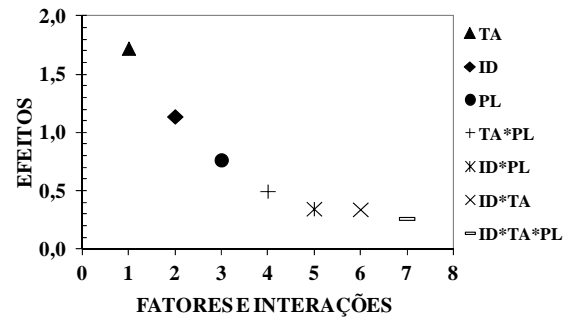


Figura 4. Gráfico de Efeitos dos fatores e interações

Essa é uma simplificação válida devido à ortogonalidade que ocorre nos experimentos em dois níveis. Se um fator ou a interação entre fatores é importante, a média do nível + do fator será consideravelmente diferente da média do seu nível -, e o valor absoluto da diferença será maior, quando comparado com os demais. Por outro lado, fatores ou interações sem importância terão pequenas diferenças nas médias e, assim, o valor absoluto será pequeno. A Tabela 4 apresenta o resumo do cálculo de efeitos estimados dos fatores e interações sobre a variável dependente Irregularidade Longitudinal.

O gráfico de Distribuição de Probabilidade Semi-Normal (Figura 5) lança os efeitos contra os valores esperados de sua distribuição normal, no entanto, apenas os valores positivos da curva de distribuição normal são considerados. Consequentemente, somente valores normais positivos são indicados no eixo horizontal. Os efeitos não importantes tendem a ter uma distribuição centrada, próximo a zero, enquanto os efeitos importantes tendem a cair fora desta distribuição centrada em zero. Para fazer a distinção entre fatores importantes e não importantes é necessário identificar onde há a aglomeração de efeitos dos fatores e suas interações, em linha, próximo de zero.

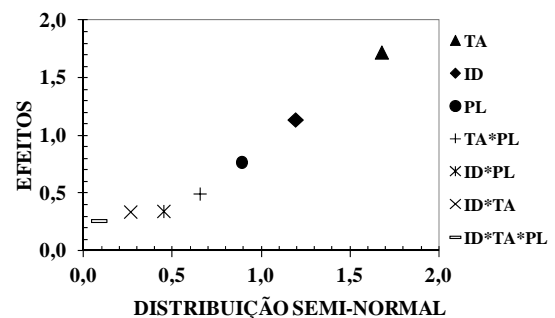


Figura 5. Gráfico de Distribuição de Probabilidade Semi-Normal dos fatores e interações

Tabela 4. Resumo do cálculo de efeitos estimados dos fatores e interações

	ID	TA	PL	ID*TA	ID*PL	TA*PL	ID*TA*PL
Y (+)	5,125	5,418	4,938	4,726	4,728	4,804	4,687
Y (-)	3,985	3,692	4,171	4,384	4,381	4,305	4,423
E	1,140	1,726	0,767	0,342	0,348	0,499	0,264

De acordo com a análise dos gráficos apresentados nas Figuras 2 a 5 obteve-se a hierarquização, em ordem decrescente de importância, dos fatores e interações: tráfego, idade do pavimento, pluviosidade e interação entre os fatores tráfego e pluviosidade. As interações entre o tráfego e a idade, entre a idade e a pluviosidade e entre a idade, o tráfego e a pluviosidade, foram consideradas não importantes.

4.2. Análise de variância

A Análise de variância é um teste estatístico que visa verificar se existe uma diferença significativa entre as médias provenientes de amostras distintas e se os fatores exercem influência no modelo. A distribuição *F* é utilizada pela Análise da Variância na decisão de aceitar ou rejeitar a hipótese de igualdade entre grupos de dados (hipótese nula). O objetivo do teste é obter o valor de $F_{observado}$, dado pela relação entre a variância entre grupos e a variância dentro de grupos. Se o $F_{observado}$ for maior que o $F_{crítico}$, para um dado nível de significância α , então a hipótese nula é rejeitada. A Tabela 5 apresenta o resumo do cálculo da Análise de Variância dos fatores e suas interações, considerando-se a variável dependente irregularidade longitudinal, para um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$, $F_{crítico} = 5,32$).

A análise de regressão foi usada para a determinação dos parâmetros do modelo estatístico para previsão do IRI, conforme apresentado na Equação 6. As equações polinomiais correspondentes aos fatores idade do pavimento, tráfego e pluviosidade são apresentadas nas Equações 7, 8 e 9.

$$IRI = 4,55 + 0,57 \times P(ID) + 0,86 \times P(TA) + 0,38 \times P(PL) + 0,25 \times P(TA) \times P(PL) \quad R^2 = 0,91 \quad (6)$$

$$P(ID) = \frac{ID - 22}{14} \quad (7)$$

$$P(TA) = \frac{TA - 1,1 \times 10^6}{1,6 \times 10^6} \quad (8)$$

$$P(PL) = \frac{PL - 505}{222} \quad (9)$$

em que,

$P(ID)$: equação polinomial para o fator idade desde a construção;

$P(TA)$: equação polinomial para o fator tráfego;

$P(PL)$: equação polinomial para o fator pluviosidade;

ID : valor quantitativo da variável idade do pavimento, em anos;

TA : valor quantitativo da variável tráfego, em número

de aplicações equivalentes do eixo-padrão; e

PL : valor quantitativo da variável pluviosidade, em mm anuais.

Para a verificação da adequação dos modelos estatísticos utilizou-se a reta de ajuste dos dados previstos aos observados, com determinação do coeficiente de correlação (r) correspondente (Figura 6), a análise de resíduos (Figura 7), e o gráfico de probabilidade normal dos resíduos (Figura 8). Deve-se destacar que o conjunto de dados observados, utilizados para validação do modelo, também foram coletados na etapa de levantamento de campo, em seções de pavimentos diferentes das que foram consideradas para o desenvolvimento do modelo de previsão de desempenho de irregularidade longitudinal.

Pela análise da Figura 6 pode-se perceber que a reta de regressão linear do IRI apresentou bom ajuste ao conjunto de pares de pontos observados e previstos, com $r = 0,83$. Entretanto, a observação da reta de regressão com o intercepto igual a 0 indica que ocorre uma pequena tendência de superestimação para menores valores e subestimação para maiores valores observados de IRI. Porém, quando se distanciam de valores extremos, os valores estimados pelo modelo de IRI aproximam-se dos valores observados. Complementarmente, a Figura 7 mostra que existe uma distribuição aleatória em torno de zero, o que indica a igualdade entre as variâncias, enquanto que a Figura 8 indica a normalidade dos dados, pois os resíduos estão distribuídos aproximadamente ao longo de uma linha reta.

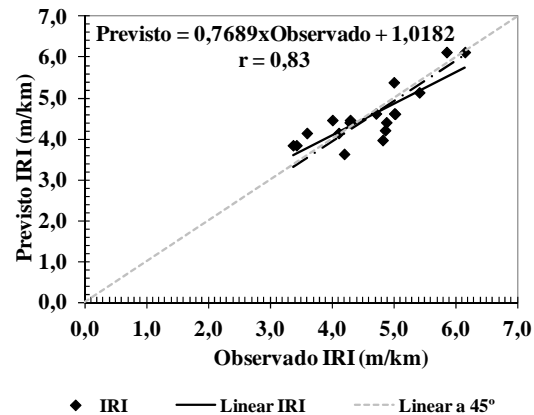


Figura 6. Correlação dos valores observados com os valores previstos

Tabela 5. Resumo da ANOVA para o experimento fatorial

Fator / Interação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Coefficiente	Fo	Significativo
ID	5,200	1	5,200	0,570	47,117	SIM
TA	11,913	1	11,913	0,863	107,947	SIM
PL	2,353	1	2,353	0,383	21,321	SIM
ID*TA	0,467	1	0,467	0,171	4,233	NÃO
ID*PL	0,483	1	0,483	0,174	4,377	NÃO
TA*PL	0,994	1	0,994	0,249	9,009	SIM
ID*TA*PL	0,279	1	0,279	0,132	2,525	NÃO
Erro	0,883	8	0,110			
Total	22,572	15		4,555		

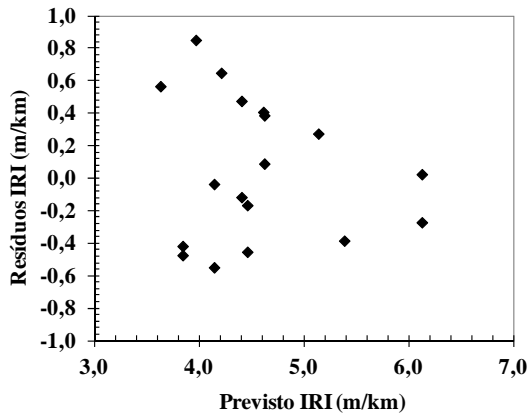


Figura 7. Gráfico de resíduos do modelo obtido

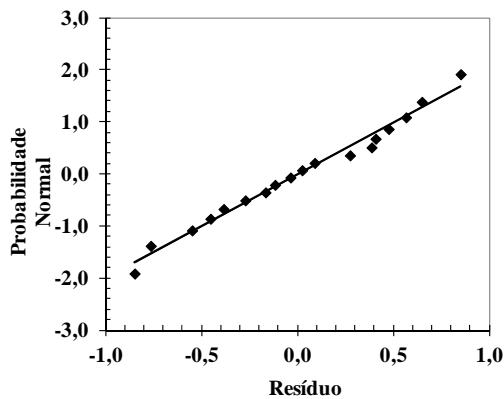


Figura 8. Gráfico de distribuição de probabilidade normal dos resíduos

5. ANÁLISE DOS EFEITOS DOS FATORES

A Tabela 6 apresenta um resumo comparativo entre os resultados obtidos pela AED e pela ANOVA e pode-se notar que os resultados da AED corroboram os resultados encontrados pela ANOVA, tanto em relação aos efeitos dos fatores como das interações. Os efeitos da idade do pavimento, do tráfego e da pluviosidade mostraram-se significativos e importantes para o modelo, assim como a interação entre o tráfego acumulado e a pluviosidade.

Tabela 6. Resumo comparativo entre os resultados da AED e da ANOVA

Fatores	AED		ANOVA	
	Importância		Significância	
	E	SIM/NÃO	F ₀	SIM/NÃO
ID	1,14	SIM	47,12	SIM
TA	1,73	SIM	107,95	SIM
PL	0,77	SIM	21,32	SIM
ID*TA	0,34	NÃO	4,23	NÃO
ID*PL	0,35	NÃO	4,38	NÃO
TA*PL	0,50	SIM	9,01	SIM
ID*TA*PL	0,26	NÃO	2,53	NÃO

Os efeitos dos fatores também foram avaliados em gráficos em três dimensões, pois a consideração de dois fatores implica no terceiro fator ser constante e igual a zero. Dessa

forma é possível avaliar o comportamento de duas variáveis, de forma simultânea. Pela análise da Figura 9 pode-se observar que o IRI aumenta quando os fatores idade e tráfego mudam do nível inferior (-1) para o nível superior (+1), sendo maior o efeito do tráfego do que o efeito da i-

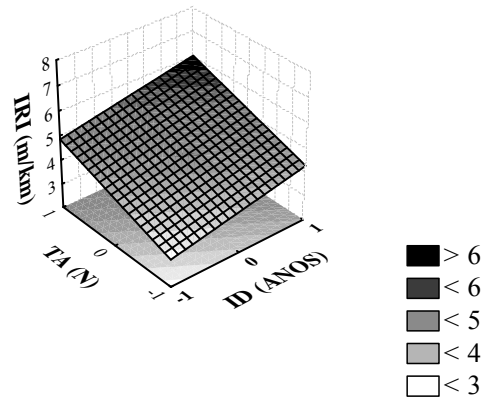


Figura 9. Efeitos dos fatores idade e tráfego acumulado sobre o IRI

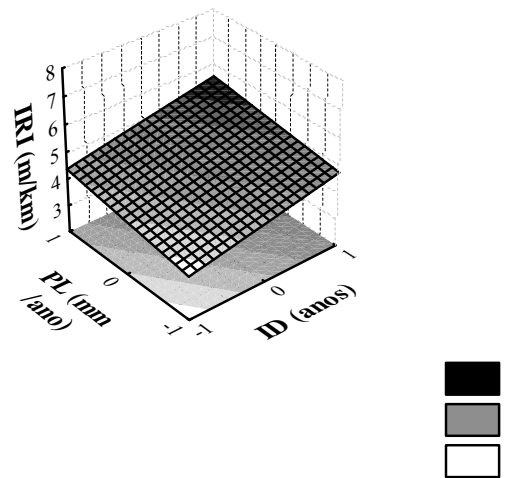


Figura 10. Efeitos dos fatores idade e pluviosidade sobre o IRI

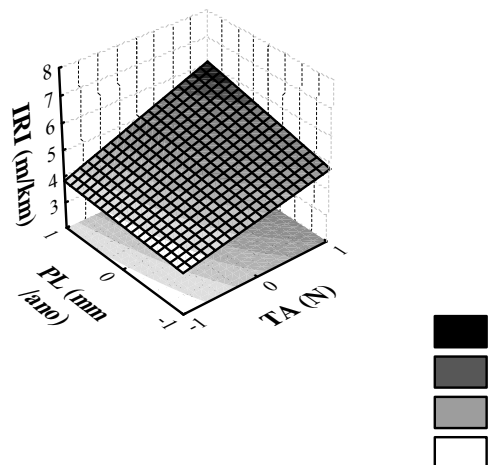


Figura 11. Efeitos dos fatores tráfego e pluviosidade sobre o IRI

dade do pavimento (maior inclinação no eixo y, no plano). Analisando-se a Figura 10 pode-se observar que o IRI aumenta quando os fatores idade e pluviometria mudam do nível inferior (-1) para o nível superior (+1), sendo maior o efeito da idade do que o efeito da pluviometria. A Figura 11 mostra que o IRI aumenta quando os fatores tráfego e pluviometria mudam do nível inferior (-1) para o nível superior (+1), sendo maior o efeito do tráfego acumulado do que o efeito da pluviometria.

6. ANÁLISE COMPARATIVA COM OUTROS MODELOS DE DESEMPENHO

O modelo de previsão do IRI desenvolvido neste trabalho foi comparado com os modelos desenvolvidos por Marcon (1996), Yshiba (2003) e Albuquerque (2007). O modelo de Paterson (1987) não apresentou bom ajuste aos dados observados, principalmente para valores de idade do pavimento maiores do que 15 anos e valores de número equivalente de operações do eixo padrão de 80 kN superiores a 1×10^5 , em que os valores do IRI previstos variavam de 10 a 80 m/km, muito diferentes dos valores observados nos trechos, durante os levantamentos, o que levou, também, à não consideração dos modelos do Programa HDM-4. Não foi possível a aplicação do modelo de Queiroz (1981), pois não havia informação sobre as deflexões recuperáveis, nem os modelos de Benevides (2006), por não ser a irregularidade longitudinal considerada em função da idade e/ou do tráfego.

Para a aplicação das equações de Yshiba (2003) e Albuquerque (2007) foi considerado o número estrutural corrigido, determinado através da Equação 10 e que leva em conta a resistência do subleito (Queiroz, 1981). O número estrutural, que representa a capacidade estrutural dos trechos, segue o conceito desenvolvido na pista experimental da AASHO (AASHTO, 1986), sendo definido por uma relação empírica em que a espessura e o coeficiente estrutural de cada camada do pavimento são combinados e somados (Equação 11).

$$SNC = SN + 3,5 \times \log CBR - 0,85 \times \log (CBR)^2 - 1,43 \quad (10)$$

$$SN = \sum_{i=1}^n a_i h_i \quad (11)$$

em que,

SNC : número estrutural corrigido;

SN : número estrutural;

CBR : Índice de Suporte Califórnia do subleito;

a_i : coeficiente estrutural da camada i ; e

h_i : espessura da camada i , em cm.

Os coeficientes estruturais das camadas foram adotados de acordo com o apresentado nos estudos desenvolvidos por Queiroz (1981) e que estão no Procedimento do DNER PRO 159/85. O valor do coeficiente estrutural utilizado para o revestimento em TSD é $a_1 = 0,04$. Os valores dos coeficientes estruturais para as camadas de base a_2 e sub-base a_3 foram obtidos por meio das Equações 12 e 13, respectivamente.

$$a_2 = \left[(29,14 \times CBR_B - 0,1977 \times CBR_B^2 + 0,00045 \times CBR_B^3) \times 10^{-4} \right] / 2,54 \quad (12)$$

$$a_3 = (0,01 + 0,065 \log CBR_{SB}) / 2,54 \quad (13)$$

em que,

CBR_B : Índice de Suporte Califórnia da camada de base granular; e

CBR_{SB} : Índice de Suporte Califórnia da camada de sub-base granular.

Para o cálculo do SNC dos trechos utilizados na validação dos modelos foram solicitadas informações ao DERBA referentes às espessuras e ao CBR das camadas dos pavimentos, pois estas informações não constavam no banco de dados original utilizado no desenvolvimento do planeja-

Tabela 7. Valores das espessuras das camadas dos trechos para cálculo do SNC

Trecho	CBR Subleito (%)	CBR Base (%)	Espessura Base (cm)	CBR Sub-base (%)	Espessura Subbase (cm)	Espessura do Revestimento (cm)	SNC
026EBA0150	34	60	15	0	0	1,5	2,68
120EBA0050	4	61	20	20	20	2,5	2,12
120EBA0050	20	61	20	0	0	2,5	2,70
148EBA0125	6	69	15	52	15	1,9	2,30
148EBA0130	6	60	20	20	20	2,5	2,52
148EBA0140	6	60	20	20	20	2,5	2,52
161EBA0065	10	50	15	25	20	2	2,71
161EBA0065	8	59	20	25	20	2	2,81
262EBA0115	6	53	12	51	15	2,5	2,10
262EBA0115	6	53	12	51	15	2,5	2,10
409EBA0015	5	75	20	21	20	2,5	2,46
409EBA0015	5	75	20	35	20	2,5	2,57
650EBA0020	6	60	20	20	20	3	2,54
884EBA0005	6	60	20	20	20	2,5	2,52
030BBA0250	6	60	20	20	20	2,5	2,52
030BBA0250	6	60	20	20	20	2,5	2,52
122BBA0500-2	9	91	20	39	15	2,5	2,98
410BBA0010-2	5	60	9,5	20	15	2,5	1,69

mento fatorial. Os valores do SNC, calculados para os trechos de validação dos modelos de Irregularidade Longitudinal, são apresentados na Tabela 7.

Pela análise da Figura 12 pode-se concluir que o modelo que apresentou melhor ajuste aos dados observados do IRI foi o desenvolvido neste trabalho ($r = 0,83$). Observa-se, também, que a inclinação da reta do modelo desenvolvido neste trabalho é similar à da reta do modelo desenvolvido por Marcon (1996), que apenas considera o fator idade, o que indica uma tendência de taxa de deterioração semelhante ao longo do tempo. O modelo de Yshiba (2003), que considera além da idade e o tráfego, o SNC, apresentou uma maior taxa de progressão da irregularidade longitudinal (maior coeficiente angular), enquanto que o modelo de Albuquerque (2007), que considera o tráfego, o SNC e uma variável climática, apresentou uma taxa de progressão do IRI menor.

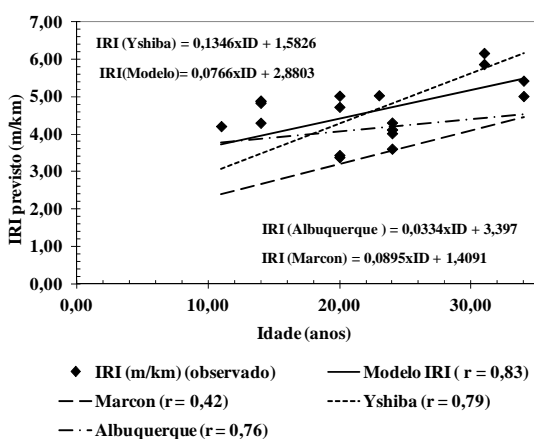


Figura 12. Análise comparativa de modelos de desempenho

7. CONCLUSÃO

Foi desenvolvido um modelo de desempenho para previsão da irregularidade longitudinal considerando dados da malha rodoviária pavimentada em tratamento superficial duplo do estado da Bahia. Foram utilizadas duas formas de análise estatística dos dados para avaliar a significância dos fatores e definir os parâmetros dos modelos de desempenho, AED e a ANOVA. A primeira mostrou-se simples e eficaz na determinação dos efeitos dos fatores e suas interações, tratando-se de uma técnica de apresentação de dados em gráficos com interpretação visual, cujos resultados corroboraram os resultados obtidos através da Análise de Variância, tanto em relação aos efeitos dos fatores como das interações.

O modelo desenvolvido neste trabalho apresentou elevado coeficiente de correlação ($r = 0,83$) e melhor ajuste aos dados observados. Quando comparado com modelos de desempenho empíricos, utilizados em programas de gestão de pavimentos por organismos rodoviários do Brasil e do exterior, apresentou melhor correlação entre valores observados e previstos, o que constitui evidência sobre a validade de sua utilização em análises de redes viárias constituídas por revestimentos asfálticos em TSD.

Há, porém, necessidade de estudos complementares, que incluam fatores que não puderam ser considerados neste trabalho (capacidade estrutural do pavimento, por exem-

plo). Para tanto, o método utilizado, baseado no planejamento fatorial, na AED e na ANOVA, poderá ser repetido, pois se mostrou capaz de definir as quantidades dos dados coletados para a realização do experimento em campo com redução de custos e sem comprometer a precisão e acurácia do modelo de desempenho obtido.

Sugere-se a comparação dos modelos de desempenho desenvolvidos neste trabalho com os modelos de deterioração do HDM-4, ferramenta computacional desenvolvida e utilizada pelo Banco Mundial, em planejamento e programação de investimentos e atividades de manutenção ou reabilitação de rodovias, por meio da aplicação do banco de dados do DERBA e dos levantamentos complementares de irregularidade longitudinal. E, para verificação da aplicabilidade do modelo do IRI desenvolvido, para condições específicas de outras malhas rodoviárias, podem ser utilizadas informações de bancos de dados de outros estados.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão de uma bolsa de doutorado, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da EESC-USP, à UFBA pelo apoio aos levantamentos de campo e ao DERBA por ceder os dados para a execução desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (1986) *Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway Transportation Officials, Washington, DC.
- Albuquerque, F. S. (2007) *Sistema de gestão de pavimentos para departamentos de estradas do nordeste brasileiro*. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Benevides, S. A. S. (2006) *Modelos de Desempenho de Pavimentos Asfálticos para um Sistema de Gestão de Rodovias Estaduais do Ceará*. 2006. 357 f. Tese (Doutorado) – Escola de COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- DERBA (2005) *Sugestões Técnicas para Implementação do Programa de Restauração e Manutenção Rodoviária*. v. 1a a 5. Departamento de Infraestrutura de Transportes da Bahia. Salvador, BA.
- DNER-PRO 159-85 (1985) *Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ.
- GEIPOT (1981) *Pesquisa Sobre o Inter-relacionamento dos Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias*. Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes, Ministério dos Transportes, Brasília, DF.
- Marcon, F. M. (1996) *Contribuição ao desenvolvimento de um sistema de gestão de pavimentos para a malha rodoviária estadual de Santa Catarina*. Tese (Doutorado). Centro Técnico aeroespacial, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Paulo.
- NIST/SEMATEC (2008) *E-Handbook of Statistical Methods*. Disponível em: <<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>> (Acesso em 10/04/2008).
- Paterson, W. D. O. (1987) *Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management*. Published for the World Bank, Washington, D.C.
- Queiroz, C. A. V (1981) *Performance prediction models for pavement management in Brazil*. Tese (Doutorado). The University of Texas at Austin, Texas.
- Yshiba, J. K. (2003) *Modelos de previsão de desempenho: estudos de rodovias do estado do Paraná*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Watanada, T.; W. Paterson; A. Bhandi; C. Herral; A. M. Dhreshwar e K. Tsunokawa (1987) *The Highway Design and Maintenance Standards Model*. v.1. Description of de HDM III model.