

Modelo de desempenho de irregularidade longitudinal desenvolvido com base em dados da rede de rodovias em tratamento superficial duplo do Estado da Bahia

Sérgio Pacífico Soncim¹, José Leomar Fernandes Júnior² e Luis Edmundo Prado de Campos³

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. 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. A Anova foi o método de análise estatística dos dados utilizado para avaliar a significância dos fatores e definir os parâmetros do modelo de desempenho. O modelo obtido foi comparado com outros modelos de previsão da irregularidade longitudinal e apresentou melhor correlação entre valores observados e previstos.

[DOI:10.4237/transportes.v21i3.681](https://doi.org/10.4237/transportes.v21i3.681).

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 surface treated asphalt highways. It is based on a factorial experiment design developed with data from the State of Bahia Department of Transportation, Brazil, and also from data collected in 2009, when approximately 3,000 km of highways were traveled and 650 km of roughness survey were performed. The factors considered were pavement age, traffic volume and climate, the last one mainly in terms of rainfall. An Analysis of Variance was performed to assess the significance of the factors and to define the parameters of the performance model. The model was compared to other roughness prediction models and showed better correlation between observed and predicted values.

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

1. INTRODUÇÃO

Um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) é um conjunto de métodos que auxilia os tomadores de decisões na busca por melhores estratégias para fornecer e manter pavimentos em condições adequadas de serventia por um determinado período de tempo. Sua função é melhorar a eficiência das decisões e ampliar suas possibilidades, avaliar as consequências das decisões tomadas, facilitar a coordenação de atividades dentro do órgão rodoviário e assegurar a consistência das decisões tomadas em diferentes níveis de gerência dentro da mesma organização.

Modelos de previsão da condição do pavimento fazem parte de um SGP 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, consequentemente, 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 segu-

rança 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 consequência, 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. 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.

O modelo obtido foi comparado com outros modelos de previsão da irregularidade longitudinal desenvolvidos para as características de outras malhas rodoviárias e apresentou melhor correlação entre valores observados e previstos. O modelo desenvolvido também foi comparado com os resultados de um estudo desenvolvido pela equipe técnica do DERBA, cujo objetivo era dar subsídios técnicos e econômicos para o planejamento de obras de reabilitação e serviços de manutenção nas rodovias estaduais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As pesquisas iniciadas na década de 1970 pela Empresa

¹ **Sérgio Pacífico Soncim**, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil. (e-mail: ssoncim@yahoo.com.br)

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

³ **Luis Edmundo Prado de Campos**, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil. (e-mail: ledmundo@ufba.br)

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, 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 R², indicando uma fraca relação entre as variáveis QI e IDADE (Equação 2).

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

$$R^2 = 0,29$$

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

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

$$R^2 = 0,75$$

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).

$$IRI = 3,331 + e^{(-0,691 - 0,187 \times C - 1,158 \times S + 0,838 \times N)} \quad (4)$$

$$R^2 = 0,80$$

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

A escolha das variáveis deve estar relacionada ao nível de gerência com que se pretende desenvolver o estudo. Neste trabalho, as variáveis foram escolhidas com base na disponibilidade de informações no banco de dados do DERBA, para o desenvolvimento do modelo de desempenho para gerência em nível de rede, e também foi levado em consideração os principais estudos desenvolvidos para as condições nacionais, conforme apresentado na revisão bibliográfica.

O planejamento fatorial do experimento considerou os fatores idade do pavimento (ID), tráfego, representado pelo número de aplicações equivalentes do eixo-padrão (*N*) 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 levantamentos. 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 aleatoriedade, pois foi necessário montar um roteiro com trechos preferencialmente sequenciais, para redução de custos. A Tabela 1 apresenta, para os 295 trechos, os valores médios, mínimos e máximos para os fatores ID, TA e PL. 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

Tabela 1. Estatísticas dos fatores ID, TA e PL para os trechos da pesquisa

<i>Fator</i>	<i>Média</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
ID (anos)	19	6	36
TA (N)	$9,94 \times 10^5$	$8,50 \times 10^4$	$4,17 \times 10^6$
PL (mm/ano)	523	303	1930

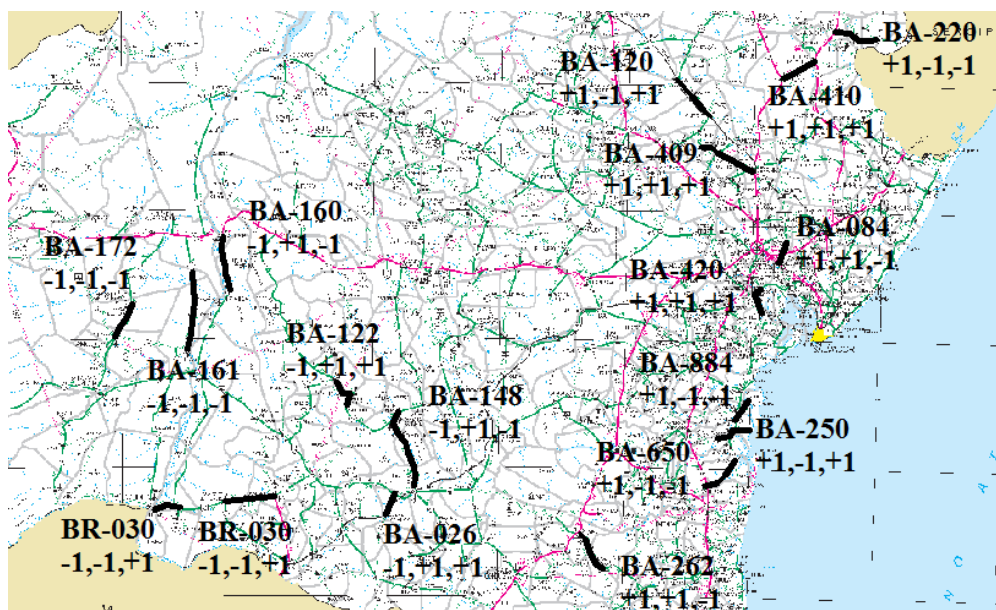


Figura 1. Localização das rodovias que tiveram trechos selecionados para levantamento de irregularidade longitudinal

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

<i>Desenvolvimento do modelo</i>		<i>Validação do modelo</i>	
<i>Código do DERBA</i>	<i>IRI (m/km)</i>	<i>Código do DERBA</i>	<i>IRI (m/km)</i>
161EBA0065	3,16	161EBA0065	3,43
161EBA0070	3,24	161EBA0065	3,37
030BBA0252	4,03	030BBA0250	3,60
030BBA0252	3,80	030BBA0250	4,11
160EBA0060	4,53	148EBA0125	4,86
160EBA0065	4,17	148EBA0130	4,71
122BBA0500-2	5,41	148EBA0140	5,01
026EBA0150	5,03	122BBA0500-2	5,41
650EBA0020	3,52	026EBA0150	5,02
884EBA0005	3,25	650EBA0020	4,20
120EBA0050	4,39	884EBA0005	4,82
250EBA0005	4,14	120EBA0050	4,29
084EBA0020	5,21	120EBA0050	4,01
262EBA0110	4,80	262EBA0115	4,29
409EBA0015	7,63	262EBA0115	4,88
410BBA0010-1	6,57	409EBA0015	5,86
		409EBA0015	6,15
		410BBA0010-2	5,00

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 120EBA0050). 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.

Os valores de irregularidade longitudinal obtidos pelos levantamentos representam o valor da média obtida para as trilhas de roda e estão apresentados na Tabela 2, respectivamente para utilização no desenvolvimento dos modelos e para a validação dos mesmos. No total foram coletados dados de 16 trechos (23 = 82 réplicas) 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 cons-

tituído 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 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 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 3 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%

Tabela 3. Resumo da ANOVA para o experimento fatorial

<i>Fator / Interação</i>	<i>Soma Quadrática</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Média Quadrática</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Fo</i>	<i>Significativo</i>
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		

($\alpha = 0,05$, $F_{crítico} = 5,32$).

A análise de regressão foi usada para a determinação dos parâmetros do modelo estatístico para previsão do IRI, conforme apresentado na Equação 5. As equações polinomiais correspondentes aos fatores idade do pavimento, tráfego e pluviometria são apresentadas nas Equações 6, 7 e 8.

$$IRI = 4,55 + 0,57 \times P(ID) + 0,86 \times P(TA) + 0,38 \times P(PL) + 0,25 \times P(TA) \times P(PL) \quad (5)$$

$$R^2 = 0,75$$

$$P(ID) = \frac{ID - 22}{14} \quad (6)$$

$$P(TA) = \frac{TA - 1,1 \times 10^6}{1,6 \times 10^6} \quad (7)$$

$$P(PL) = \frac{PL - 505}{222} \quad (8)$$

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 pluviometria;

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 pluviometria, em mm anuais.

Para a verificação da adequação do modelo estatístico utilizou-se a reta de ajuste dos dados previstos aos observados, com determinação do coeficiente de correlação (r) correspondente (Figura 2), a análise de resíduos (Figura 3), e o gráfico de probabilidade normal dos resíduos (Figura 4). 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 2 pode-se perceber que a reta de

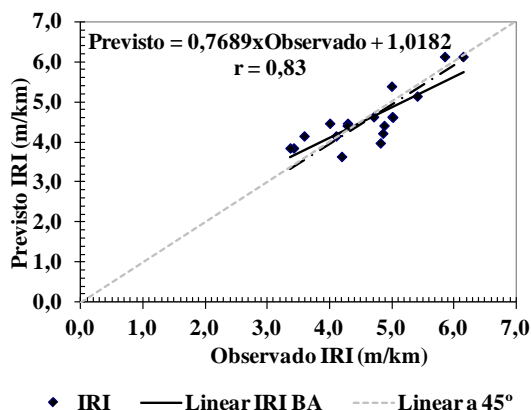


Figura 2. Correlação dos valores observados com os valores previstos

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 3 mostra que existe uma distribuição aleatória em torno de zero, o que indica a igualdade entre as variâncias, enquanto que a Figura 4 indica a normalidade dos dados, pois os resíduos estão distribuídos aproximadamente ao longo de uma linha reta.

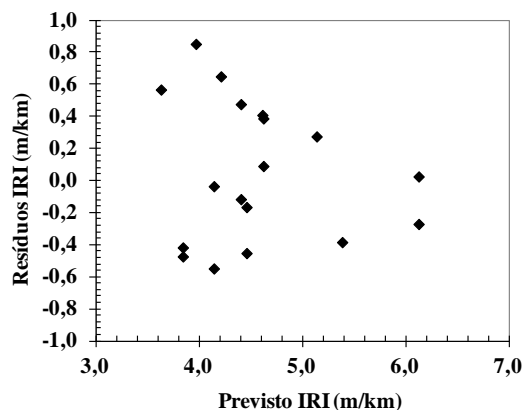


Figura 3. Gráfico de resíduos do modelo obtido

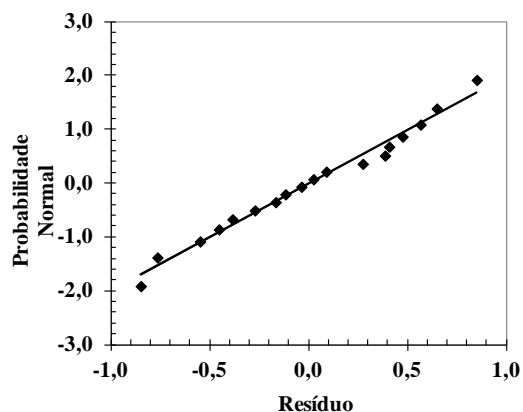


Figura 4. Gráfico de distribuição de probabilidade normal dos resíduos

5. 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 . Para esses casos, o modelo de Paterson (1987) obtinha valores de IRI que variavam de 10 a 80 m/km, muito diferentes dos valores observados nos trechos, durante os levantamentos, o que levou, também, a 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 9 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 10).

$$SNC = SN + 3,5 \times \log CBR - 0,85 \times \log (CBR)^2 - 1,43 \quad (9)$$

$$SN = \sum_{i=1}^n a_i h_i \quad (10)$$

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 11 e 12, respectivamente.

$$a_2 = \frac{29,14CBR_B - 0,1977CBR_B^2 + 0,00045CBR_B^3}{2,54 \times 10^4} \quad (10)$$

$$a_3 = \frac{0,01 + 0,065 \log CBR_{SB}}{2,54} \quad (11)$$

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 planejamento fatorial. Os valores do SNC, calculados para os trechos de validação dos modelos de Irregularidade Longitudinal, são apresentados na Tabela 4.

Pela análise da Figura 5 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 é similar à da reta do modelo de Marcon (1996), que apenas considera o fator idade, o que indica uma tendência de taxa

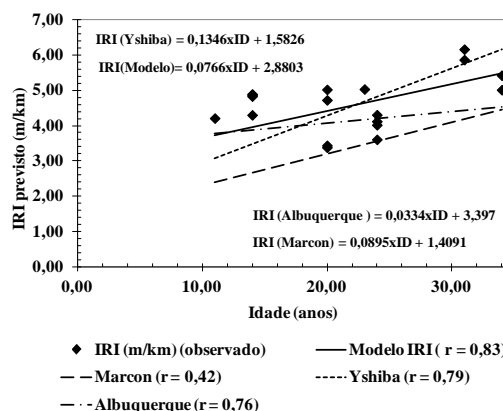


Figura 5. Análise comparativa de modelos de desempenho

Tabela 4. Valores das espessuras das camadas dos trechos para cálculo do SNC

Trecho	CBR Subleito (%)	CBR Base (%)	Espessura Base (cm)	CBR Subbase (%)	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

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.

6. ANÁLISE COMPARATIVA COM ESTUDO DESENVOLVIDO PELO DERBA

O banco de dados de rodovias utilizado neste trabalho faz parte do estudo desenvolvido pela equipe técnica do DERBA, cujo objetivo era dar subsídios técnicos e econômicos para o planejamento de obras de reabilitação e serviços de manutenção nas rodovias estaduais, através de contratos com o Banco Mundial (BIRD) (DERBA, 2005). Como parte desse estudo foi desenvolvida a Equação 13, para o cálculo do IRI, com base em avaliação de 545 km de rodovias pavimentadas. Os parâmetros da Equação 13 foram determinados por meio de análise de regressão.

$$IRI = 2,0 + 0,217104 \times IES + 0,61216 \times |ICPF - 5| \quad (13)$$

$$R^2 = 0,55$$

em que,

IRI: Índice de Irregularidade Longitudinal Internacional em m/km;

IES: Índice de Estado de Superfície; e

ICPF: Índice de Condição do Pavimento Flexível.

A definição dos segmentos onde foram realizados levantamentos de IRI foi realizada com base em gráficos estatísticos do IES (Índice de Estado de Superfície), IGGE (Índice de Gravidade Global Expedito) e ICPF (Índice de Condição do Pavimento Flexível) da malha rodoviária gerenciada pelo DERBA, e de cada residência de conservação separadamente, a fim de se obter a residência mais representativa da malha. O IES, o IGGE e o ICPF são índices de condição de pavimentos flexíveis obtidos por meio de levantamento visual contínuo, em que avaliadores percorrem de carro de-

terminados trechos rodoviários realizando uma avaliação expedita em termos de quantidade e tipo de defeitos (DNIT, 2003).

Através da comparação entre os gráficos de IES, IGGE e ICPF de toda malha rodoviária e das residências, o estudo concluiu que a residência cujo comportamento dos pavimentos mais se assemelhava à malha como um todo era a residência do município de Jequié (DERBA, 2005). Os dados de IRI foram coletados na residência do município de Jequié e abrangeram pavimentos em tratamento superficial simples e duplo, tratamento contra pó e concreto asfáltico usinado a quente, tinham eles sofrido ou não atividades de manutenção e reabilitação.

O modelo do IRI desenvolvido neste trabalho, para a rede pavimentada em TSD da malha viária da Bahia (Equação 5), foi comparado com a equação desenvolvida no estudo do DERBA (2005) (Equação 13). Primeiro foram calculados os valores previstos para o IRI, para os trechos utilizados na validação do modelo desenvolvido nessa pesquisa, e os resultados são apresentados na Tabela 5. Os valores previstos foram plotados em função da Idade dos pavimentos (Figura 6).

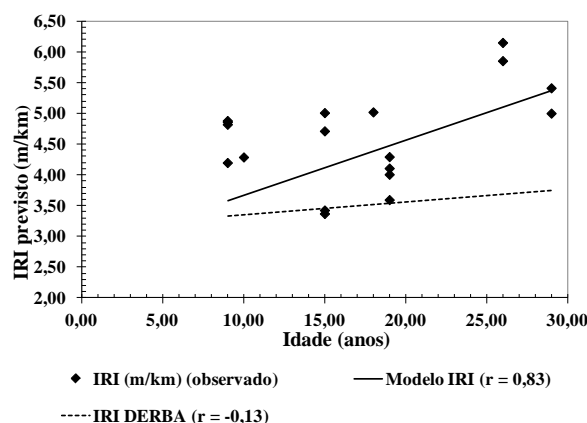


Figura 6. Análise comparativa do modelo para previsão do IRI desenvolvido e a Equação 13, para os dados coletados nesta pesquisa

Tabela 5. Valores do IRI, observados e previstos pelas Equações 5 e 13, para os dados de levantamentos realizados nesta pesquisa

Código dos trechos	IRI (m/km) (observado)	IRI (m/km) previsto pelo modelo desenvolvido	IES	ICPF	IRI previsto pela equação do DERBA (2005)
161EBA0065	3,43	3,63	4,00	3,00	4,09
161EBA0065	3,37	3,63	1,00	1,00	4,67
030BBA0250	3,60	3,92	1,00	3,00	3,44
030BBA0250	4,11	3,92	2,00	3,00	3,66
148EBA0125	4,86	3,68	4,00	4,00	3,48
148EBA0130	4,71	4,28	0,76	3,80	2,90
148EBA0140	5,01	4,28	0,75	3,40	3,14
122BBA0500-2	5,41	5,23	1,40	3,50	3,22
026EBA0150	5,02	4,32	0,00	4,00	2,61
650EBA0020	4,20	3,69	2,80	2,70	4,02
884EBA0005	4,82	3,69	1,14	3,50	3,17
120EBA0050	4,29	4,23	1,44	3,30	3,35
120EBA0050	4,01	4,23	1,00	3,10	3,38
262EBA0115	4,29	4,07	0,60	4,00	2,74
262EBA0115	4,88	3,98	0,63	3,50	3,06
409EBA0015	5,86	5,80	5,00	1,70	5,11
409EBA0015	6,15	5,80	1,00	3,00	3,44
410BBA0010-2	5,00	5,30	1,00	2,80	3,56

Tabela 6. Valores do IRI, observados e previstos pelas Equações 5 e 13, para os dados de levantamentos realizados na pesquisa DERBA (2005)

<i>Código do DERBA</i>	<i>IRI (m/km) (observado)</i>	<i>IRI (m/km) previsto pelo modelo desenvolvido</i>	<i>IES</i>	<i>ICPF</i>	<i>IRI previsto pela equação do DERBA (2005)</i>
030BBA0382-2	3,68	4,05	2,06	3,59	3,31
084EBA0020	5,12	4,87	5,00	2,00	4,92
120EBA0215	3,66	3,96	8,00	0,50	6,49
120EBA0240	4,60	3,96	1,00	3,00	3,75
547EBA0005	5,13	3,87	0,00	4,41	2,36
650EBA0020	3,37	3,29	2,80	2,65	4,35
652EBA0020	3,75	3,47	1,20	2,10	4,04

Pela análise da Figura 6 pode-se observar que o modelo que apresentou melhor ajuste aos dados observados do IRI foi o desenvolvido neste trabalho com $r = 0,83$. Também, pode-se observar que as inclinações das retas do modelo do IRI e da equação desenvolvida no estudo do DERBA (2005), que considera o IES e o ICPF como variáveis independentes, apresentaram diferentes tendências de taxas de deterioração ao longo do tempo.

Os valores previstos do IRI também foram calculados para os dados dos trechos em tratamento superficial duplo, utilizados no desenvolvimento da Equação 13, conforme apresentado na Tabela 6. Os valores do IRI observados foram levantados para os trechos em tratamento superficial duplo da Residência de Jequié (DERBA, 2005). Os valores previstos foram plotados em função da idade dos pavimentos (Figura 7).

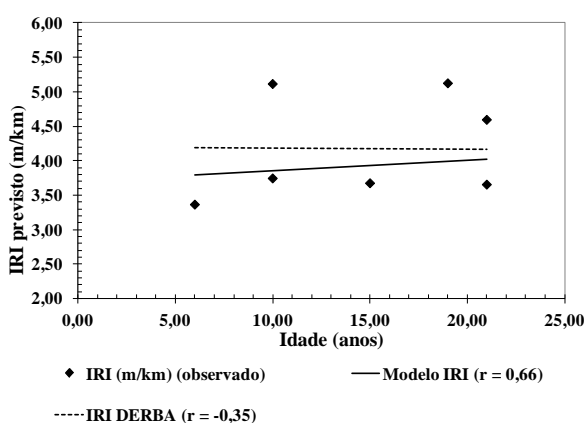


Figura 7. Análise comparativa dos dados de levantamentos realizados na pesquisa DERBA (2005)

Pela análise da Figura 7 pode-se observar que o modelo que apresentou melhor ajuste aos dados observados do IRI foi o desenvolvido neste trabalho ($r = 0,66$). Deve-se destacar que, as inclinações das retas do modelo do IRI e da Equação 13 desenvolvida no estudo do DERBA (2005) apresentaram tendências inversas de taxa de deterioração ao longo do tempo.

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. 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 pro-

gramas de gerência de pavimentos por organismos rodoviários do Brasil e do exterior. A comparação com os modelos desenvolvidos por Marcon (1996), Yshiba (2003) e Albuquerque (2007), apesar de terem sido desenvolvidos para diferentes estruturas de pavimentos e condições climáticas, foi realizada tão somente para ilustrar as limitações de modelos desenvolvidos para as condições de outras malhas rodoviárias.

Em comparação com o estudo desenvolvido pelo Departamento de Infraestrutura de Transportes da Bahia – DERBA, o modelo do IRI para a rede de rodovias em tratamento superficial duplo desenvolvido nessa pesquisa apresentou melhores resultados. O melhor desempenho do modelo do IRI desenvolvido neste trabalho pode estar relacionado ao fato de que a irregularidade longitudinal está relacionada às variáveis idade do pavimento, tráfego e pluviosidade, que são apontadas como causas da deterioração dos pavimentos, enquanto que o estudo realizado pelo DERBA relaciona a irregularidade longitudinal às variáveis Índice de Estado de Superfície (IES) e Índice de Condição do Pavimento Flexível (ICPF), que são índices obtidos a partir do levantamento de defeitos da superfície dos pavimentos, como panelas, trincas etc. Além disso, a equação desenvolvida no estudo do DERBA não foi desenvolvida para uma família específica de pavimentos.

O banco de dados original não tinha informações suficientes sobre espessuras e materiais das camadas dos pavimentos, de maneira que não foi possível incluir uma variável estrutural no experimento fatorial. Há, porém, necessidade de estudos complementares, que incluam fatores que não puderam ser considerados neste trabalho (capacidade estrutural do pavimento, por exemplo). 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 gerência 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*. Tese (Doutorado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- DERBA (2005) *Sugestões Técnicas para Implementação do Programa de Restauração e Manutenção Rodoviária*. vv. 1 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.
- DNIT-PRO 008-2003 (2003) *Levantamento Visual Contínuo para Avaliação da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 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 gerência de pavimentos para a malha rodoviária estadual de Santa Catarina*. Tese (Doutorado). Centro Técnico aeroespacial, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Paulo.
- 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. Harral, A. M. Dhareshwar e K. Tsunokawa (1987) *The Highway Design and Maintenance Standards Model*. v. 1. Description of de HDM III model.