

MÉTODOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS UTILIZADOS NO BRASIL: APLICAÇÃO E PROPOSIÇÃO DE CRITÉRIOS DE AJUSTE.

ALEXANDRE CONTI RIBEIRO DE CAMPOS, ENG CIVIL, MESTRE
ENGENHEIRO DE PLANEJAMENTO, RENOVIAS CONCESSIONÁRIA S. A.

CÁSSIO EDUARDO LIMA DE PAIVA, ENG CIVIL, DOUTOR
PROFESSOR TITULAR DA FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL DA UNICAMP

RESUMO

O trabalho estuda e compara 4 importantes modelos de previsão de desempenho de irregularidade longitudinal dos pavimentos: o modelo brasileiro do DNER PRO 159/85, o do HDM III, o do HDM 4 e o proposto por SALEH, MAMLOUK e OWUSU-ANTWI publicado no *Transportation Research Board* de 2.000, entre si e com os dados de irregularidade longitudinal levantados com medidor tipo resposta (*Bump Integrator*), contemplando seções de pavimento flexível e composto, da malha rodoviária do estado de São Paulo (Brasil), com QI inicial variando entre 12 e 22 cont/km e número N (*AASHTO*, 5 anos) entre 3,7 e $10,0 \times 10^6$. Os valores estimados pelos modelos foram comparados com os medidos em campo e foi proposta a calibração dos mesmos, através de novas equações para cada um dos modelos estudados, incluindo os coeficientes de calibração propostos.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho analisa e compara os resultados obtidos por 4 diferentes modelos de previsão de irregularidade longitudinal, visando aperfeiçoar os sistemas de gerência de pavimentos. Foram estudados, o modelo brasileiro do DNER PRO 159/85, o do HDM III, o do HDM 4 e o proposto por SALEH, MAMLOUK e OWUSU-ANTWI publicado no *Transportation Research Board* de 2.000.

A análise comparativa entre as estimativas geradas pelos modelos estudados e os dados de irregularidade longitudinal medidos em campo, se deu a partir de um levantamento de realizado com equipamento tipo resposta (*Bump Integrator*), no ano de 1.998, através do qual foi estimada, por subtrecho homogêneo de 1.000 m, para cada modelo, a irregularidade longitudinal no ano de 2.003. Estes valores foram então comparados com um novo

levantamento de irregularidade longitudinal, realizado no ano de 2.003, de forma a estabelecer, para a malha analisada, uma relação entre os dados projetados segundo os 4 métodos de previsão de evolução de irregularidade em análise e os dados levantados em campo, aferindo assim as equações que são parte integrante do processo de gerência de pavimentos, através da proposição de novas equações para os modelos calibrados.

2. LEVANTAMENTO DE CAMPO E CARACTERIZAÇÃO DOS SEGMENTOS

Para o estudo da adequação dos modelos de desempenho de irregularidade longitudinal – estudados neste trabalho, foram selecionados noventa e oito segmentos de um quilômetro de extensão, localizados em rodovias de pista simples, abrangendo pavimentos flexíveis e compostos, com números estruturais (de acordo com critério do DNER PRO 159/85) variando de 4,3 a 5,0 e submetidos a solicitações de tráfego de diversas ordens, cujos números de solicitações do eixo padrão (número N) variaram de $3,7 \times 10^5$ a $1,0 \times 10^6$, para o período de 5 anos, segundo os critérios de cálculo da AASHTO e que representassem segmentos típicos da malha viária paulista.

Os segmentos localizam-se no interior do estado de São Paulo, (um dos mais importantes estados brasileiros em termos econômicos e de desenvolvimento tecnológico), entre as cidades de Casa Branca e São José do Rio Pardo (SP 350) e entre Casa Branca e Vargem Grande do Sul (SP 215), e foram escolhidos por serem representativos dos segmentos de pista simples existentes na região nordeste do estado, por estarem em operação durante anos, por consistirem em importantes vias de escoamento da produção agrícola, por apresentarem todos os dados necessários à aplicação dos modelos de deterioração disponíveis e confiáveis, e por não terem sofrido intervenções de recuperação do pavimento, salvo a conservação de rotina, entre os anos de 1.998 e 2.003 (anos em que foi levantada a irregularidade longitudinal dos pavimentos através de equipamentos integradores tipo resposta), apresentando assim condições ideais para o estudo proposto.

Para este estudo foram conduzidas medições de irregularidade através de aparelho tipo resposta (*Bump Integrator*). Este tipo de equipamento fornece leituras, a cada lance de 320 metros, que representam o somatório dos deslocamentos verticais do eixo traseiro do veículo (ou reboque) em relação à carroceria do mesmo, em valores absolutos. A escala padrão adotada para a medida de irregularidade longitudinal do pavimento é o QI ou “quociente de irregularidade”, que é expresso em contagens por quilômetro.

Através do levantamento da irregularidade longitudinal de alguns segmentos pelo processo do nível e mira, conforme normatização do DNER, foi feita a calibração do aparelho medidor tipo resposta, para diversas velocidades médias.

Procedeu-se então o levantamento da malha em questão conforme preconizado na DNER PRO 182/94, “Medição de Irregularidades de superfície de pavimentos com sistemas integradores IPR/USP e Maysmeter” [04].

Os valores de QI levantados a cada 320 metros foram agrupados em segmentos de 1.000 metros de extensão, observando-se as características de tráfego e estrutura do pavimento, para a segmentação das rodovias estudadas.

Os segmentos estudados no presente trabalho apresentam as características listadas a seguir:

Número Estrutural (critério DNER PRO 159): de 4,3 a 5,0

Espessura da camada de rolamento: de 5 cm a 11 cm

Deflexão Recuperável: de 20 mm x 10⁻² a 71 mm x 10⁻²

Área trincada inicial (classes 2 e 3): de 3% a 50%

Irregularidade longitudinal inicial (QI): de 12,6 cont/km a 21,9 cont/km

Afundamento na trilha de roda: de 0 mm a 4 mm

Tráfego (Número N AASHTO, 5 anos): de 3,7 x 10⁵ a 1,0 x 10⁶

Precipitação média mensal: igual a 0,13 mm/mês

Número de Panelas: igual a zero.

Idade do pavimento, desde a última intervenção: de 8 a 15 anos.

3. O MODELO BRASILEIRO PRO 159/85 DO DNER

A norma DNER PRO 159/85 tem por objetivo definir procedimentos necessários à aplicação do método de projeto de restauração de pavimentos flexíveis e semi-rígidos do IPR. Estes procedimentos baseiam-se na previsão de desempenho dos pavimentos através de diversos índices, entre os quais a irregularidade longitudinal, de forma a determinar quando e que tipo de intervenção deve ser realizada no pavimento estudado, e qual o resultado esperado. A equação da curva de previsão da irregularidade longitudinal para pavimentos com revestimentos betuminosos, segundo o modelo PRO 159, é apresentada a seguir:

$$QI_{A'} = 12,63 + 0,393 \times A' + 8,66 \times \log (N_{A'}) / SNC + 7,17 \times 10^{-5} (B_E \times \log N_{A'})^2 + \Delta QI_1$$

$$A' = A + A'_E \quad (\text{para } A + A_E > 1,5)$$

$$A' = 2 / 3 \times (A + A_E) + 0,5 \quad (\text{para } A + A_E \leq 1,5)$$

$$N_{A'} = N_{p1} / (t (t + 1)^{A_E}) \times [(t + 1)^{A'} - 1]$$

$$\Delta QI_1 = QI_E - [12,63 + 0,393 \times A'' + 8,66 \times \log (N_{A''}) / SNC + 7,17 \times 10^{-5} (B_E \times \log N_{A''})^2]$$

$$A'' = A_E \quad (\text{para } A_E > 1,5)$$

$$A'' = 2 / 3 \times A_E + 0,5 \quad (\text{para } A_E \leq 1,5)$$

$$N_{A''} = N_{p1} / (t (t + 1)^{A_E}) \times [(t + 1)^{A''} - 1]$$

onde:

$QI_{A'}$ = irregularidade do pavimento existente, no ano A'

SNC = número estrutural corrigido do pavimento existente

B_E = deflexão característica do pavimento existente

A' = número de anos a partir do início de sua operação

A'_E = idade do pavimento existente, na data da coleta de dados

A = número de anos a partir de A'_E

N_{p1} = número N correspondente ao período de 1 ano, iniciado em A'_E

QI_E = irregularidade do pavimento existente, no ano A'_E

Observa-se que a irregularidade longitudinal é função da deformação recuperável (deflexão), do tráfego solicitante (Número N) e da estrutura do pavimento (SNC).

Através dos parâmetros acima listados e do último levantamento de irregularidade longitudinal, pode-se estimar quantos anos serão necessários para que seja atingida a condição limite (irregularidade máxima), e conseqüentemente quando será necessária a execução de intervenções de recuperação no pavimento, objetivando retornar a condição de conforto ao rolamento a níveis inferiores ao máximo permitido.

4. O MODELO DO HDM III

O Highway Development and Management System, conhecido como HDM, é uma ferramenta desenvolvida pelo Banco Mundial, de extrema utilidade no gerenciamento de pavimentos, posto que integra modelos de gerência de rodovias técnicos e econômicos, de forma a permitir a análise e hierarquização de soluções de investimentos em manutenção rodoviária através dos benefícios que cada alternativa trará à sociedade e através da viabilidade econômica de cada alternativa, ponderada através da taxa de retorno do empreendimento.

Mesmo após o lançamento da versão 4 do HDM, o HDM III ainda é muito utilizado pelo meio técnico brasileiro, posto que diversas empresas e órgãos públicos ainda não procederam o treinamento de seu corpo técnico para a utilização da versão mais recente. Fato este que resultou na inclusão do HDM III na presente pesquisa.

Objetivando a comparação entre diversas alternativas de investimentos em conservação / manutenção de rodovias, o HDM III utiliza-se de curvas de evolução de diversos índices referentes ao pavimento, entre eles a irregularidade longitudinal.

Considerando a grande divulgação e o prestígio com que conta o HDM III, acredita-se não ser necessária a apresentação pormenorizada das curvas de desempenho do modelo, que podem ser encontradas em CAMPOS [02].

5. O MODELO DO HDM 4

Conforme destacam BENNETT; PATERSON [01], o HDM 4 apresenta três conjuntos interativos de custos: os custos relacionados à construção, os relacionados à manutenção e os relacionados ao uso rodoviário.

As principais complementações trazidas pelo HDM 4, em relação ao HDM III, conforme apontam CARVALHO; HALLACK; SILVA [03], consistem em:

- ❑ incorporar outros tipos de pavimento, tais como pavimento de concreto;
- ❑ considerar pavimentos asfálticos em climas frios;
- ❑ atualizar as características da frota veicular;
- ❑ considerar aspectos relacionados à segurança e ao meio-ambiente;
- ❑ considerar os efeitos de congestionamento;
- ❑ atualizar o software, compatibilizando-o com o ambiente Windows.

Comparando-se a estrutura do modelo de deterioração viária desenvolvida no HDM 4, principalmente no que tange à irregularidade longitudinal, observa-se que o mesmo é muito mais flexível que o do HDM III, posto que considera uma ampla gama de tipos de pavimentos, possibilita que os modelos genéricos alterem o valor de seus coeficientes em função do tipo de pavimento, proporcionando assim o ajuste do modelo em função das condições de contorno apresentadas pelos segmentos a serem estudados, e utiliza modelos mais detalhados cujos efeitos são inter-relacionados, de modo a obter previsões mais confiáveis.

Assim como no caso do HDM III, acredita-se não ser necessária a apresentação pormenorizada das curvas de desempenho do HDM 4, posto que o modelo é demasiado extenso e as mesmas podem ser encontradas em CAMPOS [02].

6. O MODELO PROPOSTO POR SALEH, MAMLOUK E OWUSU-ANTWI

SALEH; MAMLOUK; OWUSU-ANTWI [05] desenvolveram um modelo de previsão de irregularidade longitudinal para pavimentos flexíveis, que estima a evolução da irregularidade

em função da irregularidade inicial, da espessura do pavimento, do carregamento estático por eixo e do número de repetições do mesmo ao longo do tempo. O modelo considera o comportamento visco-elasto-plástico do concreto asfáltico, e a plasticidade e a não linearidade dos materiais granulares e do subleito.

Tendo em vista o crescente uso da verificação mecânica para projetos de pavimento, ainda que o modelo de SALEH; MAMLOUK; OWUSU-ANTWI não seja largamente utilizado no Brasil, optou-se por estudar este modelo de previsão de desempenho funcional de pavimentos.

O modelo desenvolvido por SALEH; MAMLOUK; OWUSU-ANTWI [05] consiste na equação descrita a seguir:

$$\text{IRI} = -1,415 + 2,923 (\text{IRI}_0)^{1/2} + 0,00129 (\text{N})^{1/2} + 0,000113 \text{T} - 5,485 \cdot 10^{-10} \text{P}^4 - 10^{-5} \text{T} (\text{N})^{1/2} + 5,777 \cdot 10^{-12} \text{P}^4 (\text{N})^{1/2}$$

onde:

IRI = Irregularidade longitudinal após N repetições do eixo P (m/km).

N = Número de repetições do eixo considerado.

P = Carga por eixo (kN).

T = Espessura da camada de concreto asfáltico (mm).

IRI₀ = Valor inicial de irregularidade longitudinal (m/km).

7. RESULTADOS OBTIDOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O gráfico da Figura 1, apresenta a comparação entre o levantamento de campo de irregularidade longitudinal realizado no ano de 1.998, o levantamento de campo realizado em 2.003 e as projeções para a irregularidade no ano de 2.003 de cada modelo de previsão de desempenho, para os modelos estudados em sua forma original (sem que sejam utilizados fatores de ajuste). O gráfico da Figura 2, realiza a mesma comparação para os modelos ajustados através da calibração proposta no presente trabalho.

Considerando o estudo de sensibilidade dos parâmetros de entrada dos modelos e os intervalos de variação das variáveis independentes, através da comparação dos resultados obtidos pelos modelos de previsão de desempenho de irregularidade longitudinal em sua forma original (sem que sejam utilizados fatores de ajuste), pode-se concluir que:

- O modelo que apresentou as previsões mais próximas dos dados levantados em campo, tanto para os segmentos de pavimento composto quanto para os segmentos em pavimento flexível, foi o modelo proposto por SALEH; MAMLOUK e OWUSU-ANTWI, publicado no *Transportation Research Board* de 2.000.

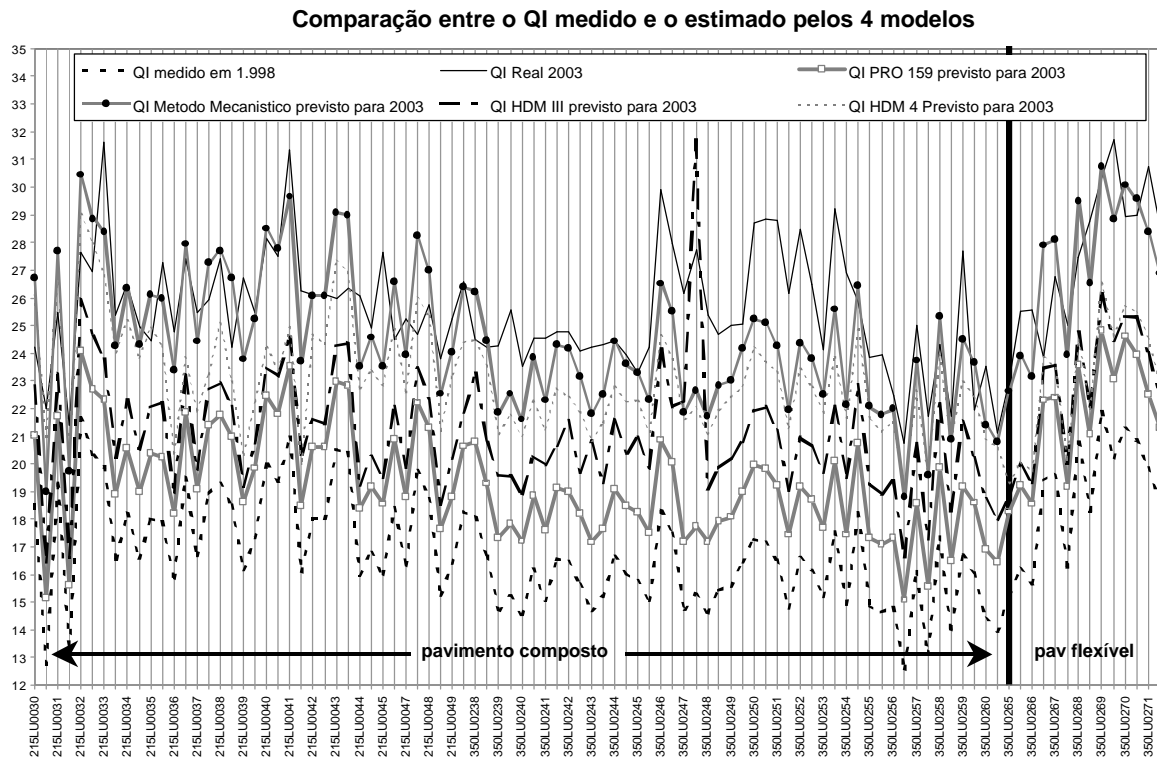


Figura 1: Comparação entre valores medidos e valores projetados pelos modelos (QI).

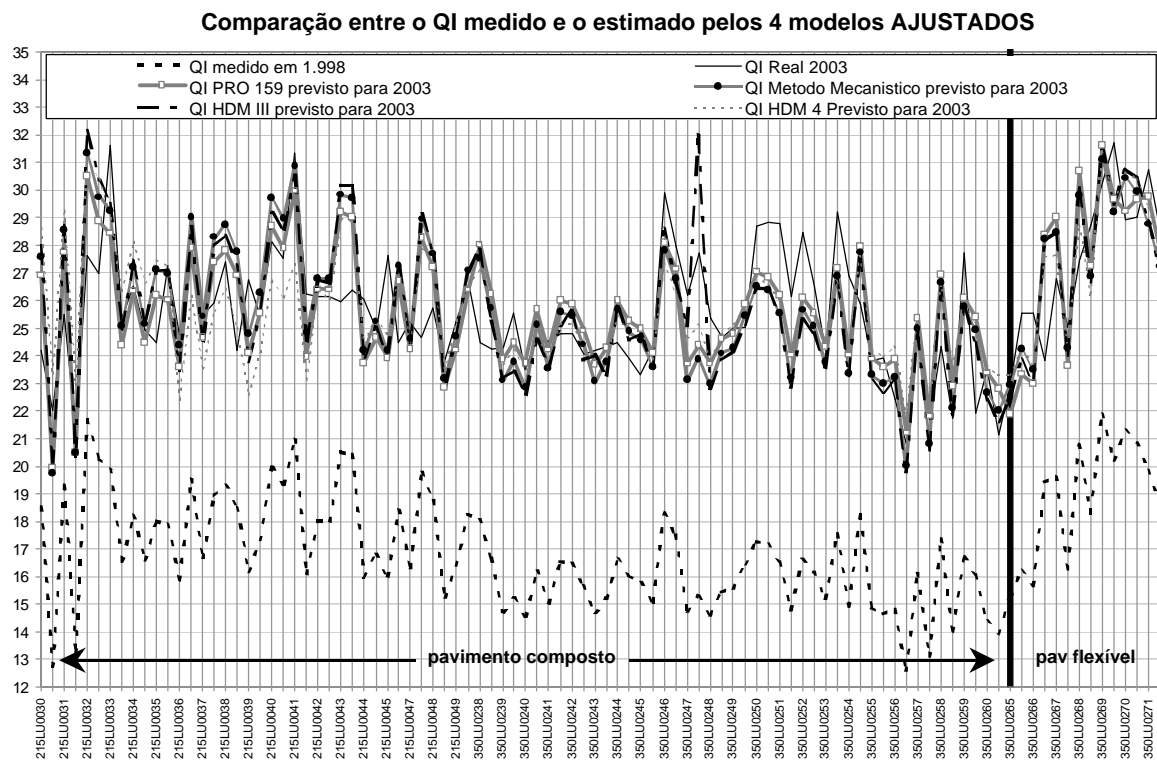


Figura 2: Comparação entre valores medidos e valores projetados pelos modelos ajustados.

- ❑ A análise de sensibilidade apontou que os resultados finais obtidos pelos modelos de previsão de desempenho de irregularidade longitudinal do pavimento do DNER PRO 159/85, do HDM III e o modelo proposto por SALEH, MAMLOUK e OWUSU-ANTWI são extremamente dependentes do valor da irregularidade longitudinal medida no início do período de análise, posto que os demais dados de entrada dos modelos representam pouca influência no resultado final.
- ❑ Já o modelo do HDM 4, apresenta resultado final muito influenciado tanto pela irregularidade inicial dos pavimentos quanto pelo número estrutural ajustado, mas também influenciam, de maneira razoável, este resultado final, as grandezas: espessura total da camada betuminosa, tráfego solicitante (número N) e CBR do subleito.
- ❑ O modelo de previsão de irregularidade do HDM 4 apresentou projeções inferiores aos levantamentos de campo, para quase todos os segmentos e projeções, pouco inferiores às do modelo mecanístico no caso do pavimento composto. Já, para os segmentos com pavimento flexível, o modelo HDM 4 apresentou estimativas mais distantes dos dados medidos em campo e do modelo de SALEH; MAMLOUK e OWUSU-ANTWI.
- ❑ O modelo do HDM III apresentou projeções pouco mais distantes dos dados levantados do que os outros dois modelos referenciados acima, e o modelo do PRO 159/85 foi o que apresentou estimativa mais distante dos dados levantados em campo no ano de 2.003, apresentando pequena variação entre a irregularidade longitudinal inicial (ano de 1.998) e os dados estimados pelo modelo para o ano de 2.003, apresentando-se como o modelo mais conservador.
- ❑ Observou-se que os valores dos resíduos, entre os valores estimados pelos modelos e os valores levantados em campo, não se situam em torno de zero, o que indicou necessidade de proposição de ajustes aos modelos.
- ❑ Os resultados obtidos demonstram que modelos sofisticados, com muitas variáveis de entrada, como é o caso do HDM 4, nem sempre funcionam bem, posto que no Brasil, muitas destas variáveis não encontram-se disponíveis e para estimá-las pode-se incorrer em erros que aumentam a imprecisão do modelo. Ao passo que modelos mais simples, como o modelo mecanístico proposto por SALEH; MAMLOUK e OWUSU-ANTWI, utilizam poucas variáveis, e por isso utilizam dados de entrada mais confiáveis, posto que estes dados encontram-se sempre disponíveis ou são facilmente levantado em campo e não precisam ser estimados, minimizando a imprecisão do modelo.

Isso posto, foram estudados ajustes a serem aplicados aos modelos de desempenho, de modo a aproximar, os valores projetados pelos mesmos dos valores reais mensurados em campo, através do integrador tipo resposta *Bump Integrator*. Estes ajustes conduziram à proposição de novas equações para os diversos modelos de desempenho, em substituição às originalmente apresentadas. As novas equações propostas para cada modelo são descritas detalhadamente em CAMPOS [02].

Os resultados obtidos com os modelos ajustados levam às seguintes conclusões:

- ❑ O ajuste dos modelos foi considerado satisfatório, posto que os modelos ajustados estimaram valores médios iguais às leituras médias de irregularidade longitudinal levantadas em campo.
- ❑ Entretanto, os coeficientes de correlação e determinação entre os dados estimados pelos modelos de previsão de desempenho ajustados e os valores medidos em campo não sofreram alterações significativas, no caso dos modelos ajustados, a não ser no caso do modelo do HDM 4, que apresentou sensível melhora em relação ao modelo não ajustado.
- ❑ Para os diversos segmentos estudados, os modelos ajustados realizaram projeções muito próximas das medidas obtidas em campo, posto que as diferenças (resíduos) absolutas e relativas máximas, médias e mínimas, entre os valores de irregularidade longitudinal estimados pelos modelos e os dados medidos em campo, foram reduzidas após os ajustes dos modelos, resultando em resíduos médios relativos iguais a 6% para todos os modelos; ou seja, a média das diferenças absolutas entre os valores estimados e os valores medidos equivale a 6% da média dos valores medidos (antes do ajuste, variavam entre 8% e 32%, dependendo do modelo).
- ❑ Os resultados obtidos neste estudo confirmam que, independente do tipo de pavimento, seja ele flexível ou composto, os modelos de previsão de desempenho existentes irão gerar previsões coerentes e próximas da realidade, desde que ajustados de maneira correta.
- ❑ Estes ajustes podem ser conseguidos através de uma série histórica de medidas com apenas dois pontos, ou seja, apenas dois levantamentos, de forma que quando não forem disponíveis levantamentos em número suficiente para a proposição de um novo modelo de deterioração, específico para a malha em estudo, os próprios modelos existentes poderão ser ajustados e utilizados de maneira confiável.

Destaca-se que os resultados obtidos serão de grande valia para os segmentos estudados e para outros segmentos que se assemelhem a estes, no que diz respeito às condições de tráfego, estrutura e demais características pertinentes, visto que foram obtidos modelos calibrados para estes segmentos, que irão propiciar maior acuracidade na avaliação do desempenho destes pavimentos, e também trará benefícios para a calibração dos modelos junto a segmentos que apresentem características diversas dos aqui contemplados, através da aplicação do mesmo método de análise utilizado no presente, que poderá ser sistematicamente utilizado na calibração dos modelos para quaisquer segmentos de interesse.

Urge lembrar que os resultados obtidos neste estudo apresentam certas limitações no que diz respeito à pequena quantidade de tipos de estruturas de pavimento estudados, às baixas magnitudes de solicitação do tráfego encontradas e à utilização de apenas um tipo de aparelho medidor de irregularidade longitudinal (aparelho tipo-resposta *Bump Integrator*). Desta forma os resultados aqui obtidos não devem ser generalizados indiscriminadamente a outros segmentos de análise.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [01] BENNETT, Christofer R.; PATERSON, William D. O. *A Guide to Calibration and Adaptation – Volume five*. The Highway Development and Management Series. França: The World Road Association (PIARC), 2000.
- [02] CAMPOS, Alexandre C. R.. *Métodos de Previsão de Desempenho de Irregularidade Longitudinal para Pavimentos Asfálticos : Aplicação e Proposição de Critérios de Ajuste*. Dissertação (Mestrado). Campinas/SP: FEC - UNICAMP, 2004.
- [03] CARVALHO, Marcos D; HALLACK, Abdo; SILVA, Eber L S. *O Projeto HDM-4/FICEM*. 30ª Reunião Anual de Pavimentação. Salvador/BA: Associação Brasileira de Pavimentação, 1996.
- [04] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. *DNER PRO 182/94 – Medição de irregularidade de superfície de pavimento com sistemas integradores IPR/USP e Maysmeter*. Brasil, 1994.
- [05] SALEH, Mofreh F.; MAMLOUK, Michael S.; OWUSU-ANTWI, Emmanuel B. *Mechanistic roughness model based on vehicle-pavement interaction*. PAVEMENT MANAGEMENT AND MONITORING TRANSPORTATION RESEARCH RECORD (1699). Washington: Transportation Research Board NATL Research Council, 2000.