



Avaliação de fatores intervenientes em vibrações verticais acima da suspensão de veículos por meio de simulações computacionais

Assessment of factors involved in vertical vibrations above vehicle suspension through computer simulations

Brenno Souza Kawashi Selli¹, Danilo Rinaldi Bisconsini²

RESUMO

A irregularidade longitudinal dos pavimentos gera vibrações em veículos rodoviários, impactando a segurança, o conforto e a economia dos usuários, e a carga dinâmica aplicada aos pavimentos. Este trabalho avalia a relação entre acelerações verticais capturadas acima da suspensão, representativas das vibrações geradas aos usuários, com parâmetros da suspensão de diferentes modelos de veículos, velocidades e níveis de irregularidade longitudinal de pavimentos, representada pelo Índice Internacional de Irregularidade (IRI). Para isto, realizaram-se simulações de um quarto de carro (QCS) para uma amostra com 36 perfis de pavimentos, dez velocidades (30 a 120 km/h) e dez modelos de veículos. A partir desta amostra, desenvolveu-se um modelo universal de regressão linear múltipla (RLM) de predição da média quadrática (RMS) das acelerações. O modelo incluiu parâmetros de suspensão das massas suspensa (ms) e não suspensa (mus), rigidez da mola entre massas (k) e do pneu (kus), fator de amortecimento da massa suspensa (c), velocidade e IRI, alcançando um coeficiente de determinação (R^2) de 0,7087. Ademais, modelos de regressão específicos para determinadas categorias de veículos e velocidades alcançaram valores de R^2 mais elevados, apontando que a particularização de modelos resulta no aumento de seu poder preditivo.

PALAVRAS-CHAVE: avaliação funcional; conforto; Índice Internacional de Irregularidade.

ABSTRACT

The longitudinal roughness of pavements generates vibrations in road vehicles, impacting users' safety, comfort, economy, and the dynamic load applied to the pavements. This work evaluates the relationship between vertical accelerations captured above the suspension, representative of the user's vibrations, and suspension parameters of different vehicle models, speeds, and levels of longitudinal roughness of pavements, represented by the International Roughness Index (IRI). We carried out quarter-car simulations (QCS) for a sample with 36 pavement profiles, ten speeds (30 to 120 km/h), and ten vehicle models. From this sample, a universal multiple linear regression model (RLM) was developed to predict the quadratic mean (RMS) of accelerations. The model included suspension parameters of the suspended (ms) and unsprung (mus) masses, spring stiffness between masses (k) and tire (kus), sprung mass damping factor (c), speed, and IRI, achieving a coefficient of determination (R^2) of 0.7087. Furthermore, specific regression models for certain categories of vehicles and speeds achieved higher R^2 values, indicating that the particularization of models increases their predictive power.

KEYWORDS: functional evaluation; comfort; International Roughness Index.

INTRODUÇÃO

A qualidade das rodovias é essencial para garantir um transporte seguro, confortável e econômico de passageiros e cargas. Para garantir adequada condição de rolamento, os pavimentos devem ser avaliados periodicamente de modo a subsidiar os gestores dessas infraestruturas quanto aos serviços de manutenção e reabilitação mais adequados e que

¹ Estudante voluntariado do Programa Institucional de Voluntariado em Iniciação Científica - PIVIC. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil. E-mail: brennoselli@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 8759659327193770.

² Docente na Engenharia Civil/DACOC. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil. E-mail: bisconsini@utfpr.edu.br. ID Lattes: 1128368580695880.



estas decisões sejam tomadas com maior antecedência de modo a otimizar a alocação de recursos. Existem métodos operacionais, estruturais e funcionais para avaliar pavimentos, sendo as condições funcionais particularmente relevantes para o conforto e a segurança dos usuários, bem como para os Custos Operacionais dos Veículos (COV). A avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos, principalmente através do Índice Internacional de Irregularidade (IRI, em inglês, *International Roughness Index*), é uma abordagem importante para avaliar as condições funcionais das rodovias de forma objetiva.

Apesar disso, muitos órgãos rodoviários responsáveis por administrar grandes redes viárias são incapazes de acompanhar a condição de toda a rede em uma periodicidade suficiente para que os dados sejam úteis para a tomada de decisões quanto a atividades de manutenção preventivas (WANG et al., 2020). Por este motivo, tem-se investigado o uso de dados de aceleração fornecidos por smartphones para a avaliação da irregularidade (KUMAR et al., 2017; ZHAO, B. et al., 2017; ALEDELAT et al., 2018; WANG et al., 2020; OPARA et al., 2022), relacionando-se as vibrações provocadas em veículos com o nível de irregularidade dos pavimentos. Quanto maiores as acelerações verticais, maiores as vibrações e, portanto, pior é a qualidade de rolamento.

Liu et al. (2021) propuseram a avaliação da irregularidade por meio de uma abordagem de uso de dados de múltiplos veículos, por meio de simulações computacionais, Zhao, L. et al. (2017) por outro lado, optou por realizar as análises com um terceiro grau de liberdade, considerando agora um sistema de amortecimento para o condutor. Nessa linha, esta pesquisa investigou a variabilidade das acelerações verticais medidas acima da suspensão de veículos rodoviários decorrente da variação da irregularidade longitudinal de pavimentos, aqui representada pelo IRI, do modelo do veículo e de sua velocidade.

A principal diferença para os estudos citados, é que o trabalho atual relacionou os valores de IRI dos perfis com os valores de RMS gerados por meio de simulações computacionais diretas de um quarto de carro (em inglês, *quarter car simulation - QCS*), sobre pavimentos (cotas da superfície de pavimentos medidas e interpoladas para a criação de perfis). Modelos de predição da aceleração vertical foram gerados a partir dessas variáveis. Os resultados servem de direcionamento para futuras investigações, em escala real, aplicando smartphones embarcados em veículos, para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos e sua dependência quanto ao modelo do veículo e velocidade para diferentes níveis de irregularidade longitudinal.

MÉTODO

O método desenvolvido nesta investigação foi delineado para responder a seguinte pergunta: “É possível gerar modelos de predição da média quadrática (em inglês, *Root Mean Square – RMS*) das acelerações verticais acima da suspensão a partir da variação de dados de veículos, velocidade e irregularidade?”. Para isto, foram obtidos dados de aceleração vertical medidos acima da suspensão (de forma análoga às que seriam obtidas a partir de um smartphone alocado em um veículo), em dez (10) veículos, em dez (10) velocidades (de 30 km/h a 120 km/h), se deslocando por trinta e seis (36) perfis de superfície de pavimentos, com 1500 metros de extensão cada.

As simulações foram realizadas na versão acadêmica do programa MatLAB 2022b. A excitação do sistema se deu pelo uso de 36 perfis longitudinais de elevação, obtido do eixo central de pistas de aeroportos, com revestimento de concreto asfáltico, do banco de dados da FAA (*Federal Aviation Administration*), gerados nos estudos de avaliação



subjettiva obtidos em simuladores de voo *Boeing 737-800 (B-737)* e *Airbus A330-200 (A330)* (FAA, 2017; 2020). Os dados foram aplicados no programa ProVAL (*Profile Viewing and Analysis*), versão 4.03, criado pelo programa LTTP (*Long-Term Pavement Performance*) da FHWA (*Federal Highway Administration*) para o cálculo do IRI. Os parâmetros de suspensão utilizados para as simulações são apresentados na Tabela 1, já os valores para cada um dos veículos estão descritos na Tabela 2.

Tabela 1 - Parâmetros de suspensão considerados nas simulações

Parâmetro	Unidade	Variável
Rigidez da mola entre as massas	N/m	k
Fator de amortecimento massa suspensa	Ns/m	c
Massa suspensa	kg	ms
Massa não suspensa	kg	mus
Rigidez do pneu	N/m	kus

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Tabela 2 - Parâmetros de suspensão dos veículos simulados

Categoria	Ms (Kg)	Mus (Kg)	C (Ns/m)	K (N/m)	Kus (N/m)
C-Hatchback (C-HB)	318,5	71	3551	27000	228000
F-Sedan (F-SDN)	455,75	100	3551	83000	230000
D-SUV (D-SUV)	357,25	80	5189	130000	230000
B-Sports (B-SPORT)	255	60	3551	130500	230000
B-Hatchback (B-HB)	277,75	60	3551	28000	230000
A-Hatchback (A-HB)	186,75	41,5	1876	14000	200000
CS-Stockcar (STOCK-CAR)	455	70	5189	40000	230000
P1 (P1)	325	40	3100	38889	200000
European Van (VAN)	275	100	2301	31000	200000
D-Sedan (D-SDN)	342,5	80	3551	153000	230000

Fonte: elaborado pelos autores (2023) com base em Liu *et al.* (2021)

Para realizar as simulações de deslocamento de um quarto-de-carro (ou $\frac{1}{4}$ de carro, em inglês, *quarter car* – QC), em diferentes velocidades, sobre os perfis mencionados, utilizou-se o código apresentado por Rocha (2021). O código foi adaptado para gerar resultados em lote, em vez de apenas um veículo por vez e uma velocidade. Após sua aplicação, obtiveram-se 216.000.000 dados de *Asus* (aceleração vertical acima da suspensão), considerando as combinações de 10 velocidades, 10 modelos de veículos e 36 perfis de pavimentos, com 1500 metros de extensão cada, obtidos a partir de cotas de elevação disponíveis a cada 25 mm. Devido ao volume de dados excessivo optou-se por resumir os dados de aceleração a partir do cálculo da raiz do valor quadrático médio (RMS) da *ASus* (Eq. 1) para cada segmento de 100 metros de cada perfil de 1500 metros, sendo que os dados de IRI foram calculados para esses mesmos segmentos de 100 metros.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (1)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para uma análise mais abrangente da variação do RMS pela variação do IRI, velocidade e parâmetros de suspensão, aplicou-se a análise de variância ANOVA



tomando o RMS como variável dependente e as demais como independentes, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Resumo dos resultados de análise de variância ANOVA

Estatísticas de regressão		Coeficientes		valor-P
		Interseção	-1,291631574	2,02E-278
R múltiplo	0,841891025	IRI	0,308365131	0
R-Quadrado	0,708780497	V	0,007961653	0
R-quadrado ajustado	0,708742741	k	5,29E-01	0
Erro padrão	0,369045512	c	-2,67E+00	1,29E-12
F de significação	0	ms	-0,001323925	0
Observações	54000	mus	-0,001018681	2,77E-17
		kus	4,64E-01	2,22E-125

Fonte: elaborado pelos autores (2023)

O modelo apresenta significância estatística num intervalo de confiança de 95% com um R² de 0,7087, indicando sua relevância para prever o RMS da aceleração suspensa. O modelo resulta de 54.000 observações. Todas as variáveis independentes apresentaram valores-p menores que 0,05. Esta análise sugere que é possível criar modelos de previsão do RMS usando dados de aceleração, velocidade e parâmetros de suspensão do veículo. Entretanto, um dos desafios práticos da aplicação do modelo seria obter os parâmetros de suspensão dos veículos, uma vez que este dado não é disponibilizado pelas montadoras. A seguir, apresenta-se a Equação 2, referente ao modelo desenvolvido:

$$RMS(IRI, V, k, c, ms, mus, kius) = 0,308 * IRI + 0,007 * V + 5,291 * 10^{-6} * k - 2,670 * 10^{-5} * c - 0,001 * ms - 0,001 * mus + 4,636 * 10^{-6} * kus - 1,291 \quad (2)$$

O efeito das variáveis veículo, velocidade e irregularidade sobre os dados de aceleração também foi abordado na forma de gráficos (Figura 1) entre o RMS médio (eixo das ordenadas) das acelerações, referentes à média de 1500 m de extensão de cada um dos 36 perfis utilizados no estudo, e o IRI médio (eixo das abscissas) para esses mesmos trechos, para todos os veículos, nas velocidades de 50 km/h, 80 km/h e 110 km/h (Fig. 1).

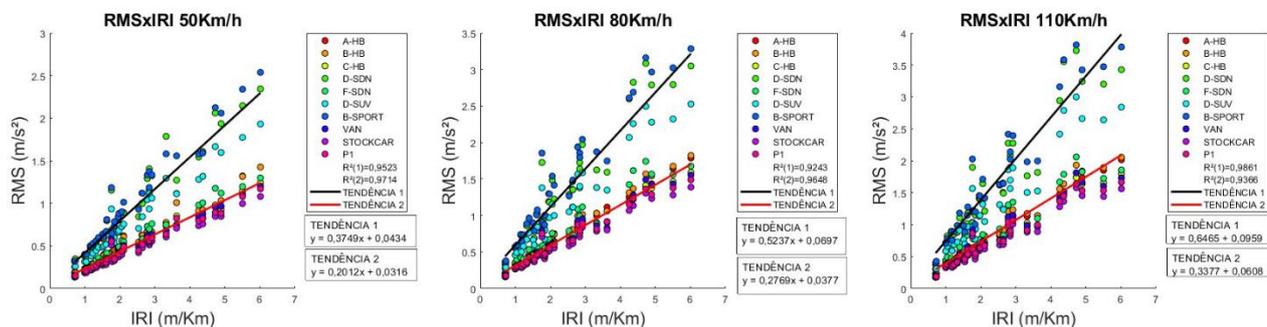


Figura 1. Relação entre RMS e IRI, para diferentes veículos, a 50 km/h, 80 km/h e 110 km/h

Nota-se que, para as três velocidades selecionadas, que os modelos de veículos D-SDN, D-SUV e B-SPORT, aqui chamados de grupo 1, apresentaram uma taxa de crescimento de vibrações pelo aumento do IRI significativamente maior do que as demais categorias de veículos, aqui chamadas de grupo 2, o que pode ser interpretado de forma mais objetiva a partir das linhas de tendência plotadas para estes dois grupos



de veículos. Este resultado aponta a necessidade de estudos mais detalhados sobre as características de suspensão dos modelos de veículos que fazem certos modelos serem mais suscetíveis à variação do IRI, possibilitando a criação de modelos preditivos específicos para determinadas categorias de veículos.

Também se observa um aumento do RMS a partir do aumento da velocidade e da irregularidade como mostra a Equação 2. Esse aumento também foi observado por Zhao, B. et al. (2017) e Zhao, L. et al. (2017). Contudo Zhao, L. et al. (2017) obtiveram valores de RMS referentes à apenas uma observação para diferentes velocidades, referente ao uso de um único perfil de rolamento e apenas uma categoria de veículo. Por outro lado, Zhao, B. et al. (2017), que também alcançaram resultados similares aos obtidos no trabalho presente, monitoraram 72 veículos, de diferentes categorias, que ao todo percorreram aproximadamente 180.000km. Neste caso, os autores obtiveram valores de RMS próximos de 3 m/s² para valores de IRI acima de 15 m/km, apesar de também terem alcançado um coeficiente de correlação de 0,995. Este resultado não foi observado em nenhuma das simulações realizadas neste trabalho, já que o IRI apresentou valor máximo de 6,011 m/km, enquanto o RMS não passou de 5 m/s². Essa diferença pode ter ocorrido pela forma como os autores propuseram a correlação entre RMS e IRI, na qual a obtenção das acelerações também incluiu o modelo de meio carro (do inglês, *half-car* – HC). Portanto, pretende-se realizar estudos futuros comparando essas diferentes modelos de simulação.

CONCLUSÃO

Conclui-se que as variáveis veículo, velocidade e irregularidade longitudinal tem potencial para explicar a variação das acelerações verticais medidas acima da suspensão. Considerando que uma amostra com 216.000.000 de dados foram utilizados para a geração de um modelo genérico de predição da média quadrática (RMS) das acelerações a partir da velocidade, parâmetros de suspensão (parâmetros de massa-mola-amortecedor) de diferentes modelos de veículos e irregularidade longitudinal (representada pelo IRI), verificou-se que a variação das variáveis explicaram mais de 70% ($R^2 = 0,7087$) da variação do RMS da massa suspensa, com significância estatística para todos os coeficientes obtidos na equação, para um intervalo de confiança de 95%. No entanto, os resultados continuam apontando a possibilidade de uso de novas formas de avaliação da irregularidade longitudinal, como o uso de smartphones embarcados em veículos. Entretanto, também se observou que as acelerações verticais aumentaram a uma taxa superior, conforme o aumento do IRI, para modelos de veículos B-SPORT, D-SDN e D-SUV em relação às demais categorias de veículos. Assim sendo, pretende-se dar continuidade ao estudo investigando mais detalhadamente as características de suspensão mais importantes para essa diferença, contribuindo para o estudo de modelos mais específicos para determinadas categorias de veículos pois, na bibliografia estudada, nenhum trabalho apresentou volume de dados semelhantes ao que fora desenvolvido aqui com os mesmos métodos.

Agradecimentos

Ao Programa Institucional de Voluntariado em Iniciação Científica – PIVIC.



Disponibilidade de código

O código final está indisponível para terceiros por razões de otimização e existência de laços cuja repetição corrobora erros caso não haja conhecimento do uso correto.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

ALEDELAT, W. et al. Evaluation of Pavement Roughness Using an Android-Based Smartphone. **Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements**, [s. l.], v. 144, n. 3, p. 04018033, 2018. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/JPEODX.0000058>.

FAA. **Boeing 737-800 Final Surface Roughness Study Data Collection**. Final Report DOT/FAA/TC-18/8. Federal Aviation Administration. William J. Hughes Technical Center. Aviation Research Division. Atlantic City International Airport, New Jersey 08405, 2017.

FAA. **Airbus A330-200 Final Surface Roughness Study Data Collection**. Final Report DOT/FAA/TC-18/13. Federal Aviation Administration. William J. Hughes Technical Center. Aviation Research Division. Atlantic City International Airport, New Jersey 08405, 2020.

International Organization for Standardization – ISO. **ISO 2631-1: Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to wholebody vibration — Part 1: General requirements**. 1997.

KUMAR, R.; MUKHERJEE, A.; SINGH, V. P. Community Sensor Network for Monitoring Road Roughness Using Smartphones. **Journal of Computing in Civil Engineering**, [s. l.], v. 31, n. 3, 2017. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CP.1943-5487.0000624>.

LIU, C. et al. Large-scale pavement roughness measurements with vehicle crowdsourced data using semi-supervised learning. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, [s. l.], v. 125, p. 103048, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0968090X21000784>.

OPARA, K. R. et al. Road Roughness Estimation Through Smartphone-Measured Acceleration. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 209–220, 2022. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9345727/>.

ZHAO, B. et al. Vehicle Model Calibration in the Frequency Domain and its Application to Large-Scale IRI Estimation. *Journal of Disaster Research* 12 (3), 446-455, 2017a. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jdr/12/3/12_446/_article/-char/ja/.

ZHAO, L. et al. An analytical formula of driver RMS acceleration response for quarter-car considering cushion effects, *Vehicle System Dynamics*, 55:9, 1283-1296, 2017b. Disponível em: 10.1080/00423114.2017.1308524.