

Avaliação funcional de pavimentos com smartphones

Functional pavement evaluation with smartphones

RESUMO

A condição funcional de pavimentos está relacionada com a qualidade de rolamento das rodovias, a qual afeta a segurança de tráfego e os Custos Operacionais dos Veículos (COV). Esse parâmetro pode ser caracterizado de forma objetiva a partir da quantificação irregularidade longitudinal de pavimentos. Vários equipamentos têm sido desenvolvidos para realizar a medição deste defeito, no entanto, ainda não há um equilíbrio entre os métodos disponíveis, em termos de acurácia, produtividade e custos de implementação e operação. Neste estudo, desenvolveu-se uma versão preliminar de aplicativo para smartphones que utiliza dados do acelerômetro e GPS (*Global Positioning System*) para o cálculo do índice RMSVA (*Root Mean Square of Vertical Acceleration*) que é correlacionado ao IRI (*International Roughness Index*) para a estimativa da condição funcional de pavimentos. O coeficiente de correlação de Pearson (r) entre IRI e RMSVA ficou em torno de 0,9, e Coeficiente de Variação (CV) médio do RMSVA de 4 a 9%, em análise de repetitividade. Apresenta-se uma aplicação do sistema em um trecho de 2km da rodovia PR-493. Conclui-se que os smartphones podem ser utilizados de forma prática e com um baixo custo para o monitoramento de trechos de pavimentos com condições prioritárias de manutenção.

PALAVRAS-CHAVE: Avaliação de pavimentos. Rodovias. Manutenção de rodovias. Smartphones.

ABSTRACT

The pavement functional condition is related to the rolling quality of the highways, which affects traffic safety and Vehicle Operating Costs (VOC). This parameter can be objectively characterized by quantifying longitudinal pavement roughness. Several devices have been developed to measure this defect, however, there is still no balance between the available methods in terms of accuracy, productivity and implementation and operation costs. In this study, a preliminary version of smartphone application that uses accelerometer data and Global Positioning System (GPS) was developed to calculate the Root Mean Square of Vertical Acceleration (RMSVA) index which is correlated to the International Roughness Index (IRI) for the estimation of the functional condition of pavements. Pearson correlation coefficient (r) between IRI and RMSVA was around 0.9, and mean RMSVA coefficient of variation from 4 to 9%, in repeatability analysis. An application of the system is presented in a 2km stretch of the PR-493 highway. It is concluded that smartphones can be used practically and at a low cost to monitor pavements with priority maintenance conditions.

KEYWORDS: Pavement evaluation. Highways. Road maintenance. Smartphones.

Jakeline Loureiro

jakelineloureiro@alunos.utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, Brasil.

Danilo Rinaldi Bisconsini

bisconsini@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, Brasil.

Thais Bassotto Bressanelli

thais_bressanelli@hotmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, Brasil.

Mateus Paluch de Souza Bueno

Mateusbueno00@gmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, Brasil.

Igor Frassoni Guedes dos Santos

igors@alunos.utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, Brasil.

Barbara Klaumann Lucas

barbara_lucas@hotmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, Brasil.

Bruno Alessandro Farias

brunofarias@alunos.utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, Brasil.

Vinicius Pegorini

vinicius@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, Brasil.

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

A frequência de monitoramento de rodovias é fundamental para o indicativo das possíveis causas de deterioração dos pavimentos (fatores relacionados ao tráfego, clima, processos construtivos, etc.), no controle da evolução dos defeitos e para a obtenção de modelos de desempenho. A partir desses dados, busca-se a melhor estratégia para os serviços de manutenção e reabilitação no contexto dos Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGP). Dentre os defeitos monitorados por órgãos rodoviários, a irregularidade longitudinal é tida como a mais importante em rodovias rurais. Isso porque a irregularidade, representada principalmente pelo IRI (*International Roughness Index*), é um dos índices mais apropriados para a obtenção dos Custos Operacionais dos Veículos (COV), da qualidade de rolamento global, dos danos provocados pela carga dinâmica de veículos, dos limites de segurança em curvas e frenagens, e pelas características de irregularidade de superfície que afetam a resposta dos veículos (SAYERS e KARAMIHAS, 1998).

Diversos pesquisadores têm discutido o uso de acelerômetros comerciais e, mais recentemente, de smartphones, para o monitoramento de pavimentos. Dentre as abordagens mais comuns, está a utilização dos sinais de aceleração vertical para a estimativa de irregularidade longitudinal de pavimentos. Dentre os motivos que têm fomentado tais estudos, estão a constante evolução da tecnologia desses dispositivos, o que inclui sensores como os acelerômetros, giroscópios e GPS, a possibilidade de aplicação direta dos dados coletados, sem cabos, e o baixo custo do sistema em potencial. Ademais, o próprio aparelho pode fornecer um mapa temático, dentro de uma plataforma SIG (Sistemas de Informações Geográficas), com a indicação de segmentos críticos de intervenção. O principal desafio é a definição de um sistema que apresente, além de atributos como praticidade e baixo custo, também confiabilidade, que passa pela necessidade de investigação dos fatores que podem afetar a qualidade dos dados obtidos e a definição de procedimentos práticos para sua aplicação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a avaliação funcional de pavimentos, tomou-se como referência o índice IRI. Realizaram-se levantamentos topográficos, com Nível e Mira, em cinco trechos, com diferentes níveis de irregularidade, segmentados a cada 100 metros, em um total de 1500 metros. Utilizaram-se os seguintes trechos (Figura 1): via de acesso de uma empresa de grãos (SG), rua Benjamim Borges (BB), Avenida da Inovação (AI), rua Irineu Parzianello (IP) e Via do Conhecimento (PR-493).

Figura 1 - Levantamento topográfico em rodovias: a) SG; b) BB; c) AI; d) IP; e) PR.



Fonte: Autoria própria (2019).

Com o programa ProVAL (*Profile Viewing and Analysis*) e os valores das cotas acumuladas a cada 50 cm, como recomendado pela norma DNER-ES 173/86, que trata dos procedimentos de calibração de medidores de irregularidade do tipo

resposta, obteve-se o IRI dos segmentos selecionados, com base na média aritmética do IRI obtido nas trilhas de roda externas e internas de cada trecho.

Nos mesmos trechos onde se obteve o IRI, foram medidos sinais de aceleração verticais fornecidos por smartphones embarcados em veículos, a partir de uma taxa de aquisição de 200 Hz (dados por segundo) e as coordenadas do GPS a uma taxa de 1 Hz. Para avaliar a relação entre o IRI e os dados gerados por smartphones em diferentes cenários, foram realizados levantamentos com diferentes modelos de smartphones, veículos e tipos de montagem do smartphone. Os diferentes tipos de montagem dos smartphones se referem à forma pela qual os dispositivos foram fixados aos veículos, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Suportes veiculares utilizados: a) para-brisas com apoio, b) para-brisas sem apoio e c) painel; e d) interface da versão preliminar do aplicativo desenvolvido.



Fonte: Autoria própria (2019).

O veículo trafegou com velocidades de 40 e 60 km/h. Outras velocidades não foram avaliadas por condições operacionais adversas nos trechos em estudo. Foram investigados alguns fatores que podem influenciar nas medidas geradas por esse sistema, como os tipos de montagem, velocidade e número de coletas. Com as acelerações verticais medidas, calculou-se o RMSVA (*Root Mean Square of Vertical Acceleration*) para as coletas cumpridas em cada trecho, como indicado na Eq. (1), em que “az” representa a Aceleração Vertical e “n” o Número de Dados.

$$RMSVA = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N a_{zi}^2} \quad (1)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O IRI obtido nos diferentes trechos variou de 1,9 m/km a 6,7 m/km, nos trechos AI e PR, respectivamente, com uma média de 4,3 m/km e um desvio padrão de 1,3 m/km. Os valores de IRI obtidos foram confrontados com os dados de aceleração verticais fornecidos por smartphones embarcados em veículos, a partir da análise da correlação entre IRI e RMSVA, além da análise da repetitividade do RMSVA. A seguir, apresenta-se uma análise de algumas variáveis que afetam a correlação entre RMSVA e IRI, assim como um exemplo de aplicação do sistema.

VELOCIDADE

Os resultados indicaram uma maior correlação entre RMSVA e IRI para os dados coletados a 60 km/h, com r de Pearson de 0,86, contra um r de Pearson de 0,38, para a velocidade de coleta de 40 km/h. Supõe-se que o resultado esteja relacionado ao fato de que em menores velocidades há uma menor excitação do

chassi em relação às irregularidades do pavimento. Além disso, os ruídos provenientes principalmente das rotações do motor passam a ter maior influência sobre os sinais do smartphone, já que a ordem de grandeza de ambos se aproxima.

TIPO DE MONTAGEM

Para a análise da influência do tipo de montagem, foram realizadas medições com um veículo parado, com a marcha em ponto neutro, com o objetivo de verificar o efeito do ruído gerado pelo motor sobre os sinais coletados a partir de diferentes tipos de montagem. A análise da amplitude do ruído, em termos de RMSVA, foi importante para notar o efeito que o ruído pode representar na correlação IRI-RMSVA. Boa parte das coletas foram realizadas com o suporte do tipo para-brisas com o smartphone apoiado no painel (Figura 2a). O RMSVA médio obtido nos trechos foi de $0,9 \text{ m/s}^2$, sendo que a rotação média foi de 1800 rpm. Nesta rotação, o ruído estimado para o suporte do tipo painel, para-brisas com apoio no painel e para-brisas sem apoio foram de cerca de $1,5 \text{ m/s}^2$, $0,67 \text{ m/s}^2$ e $0,13 \text{ m/s}^2$, respectivamente. Observa-se que o suporte para-brisas sem apoio no painel foi o que resultou em um menor nível de ruídos, resultado que pode estar atrelado ao fato de deste não incorporar ressonâncias do painel.

APLICAÇÃO DE FILTROS DIGITAIS PARA A REMOÇÃO DE RUÍDOS

Para atenuar o efeito dos ruídos do motor do veículo, observados na análise dos tipos de montagem, aplicou-se um filtro de Fourier tipo passa-faixa de 0,2 Hz a 25 Hz sobre os dados coletados. O filtro passa-alta com valor de corte de 0,2 Hz foi suficiente para remover o efeito da gravidade nas acelerações verticais, enquanto o filtro passa-baixa de 25 Hz foi utilizado para a remoção de frequências altas do ruído do motor. Os filtros proporcionaram um aumento da correlação IRI-RMSVA, principalmente para os dados coletados a 40 km/h, nos quais a ordem de grandeza do ruído é similar à do RMSVA médio. O coeficiente de correlação r de Pearson aumentou de 0,38 (sem filtro) para 0,89 (0,2-25 Hz) para a velocidade de 40 km/h e para 60 km/h aumentou de 0,86 (sem filtro) para 0,90 (0,2-25 Hz).

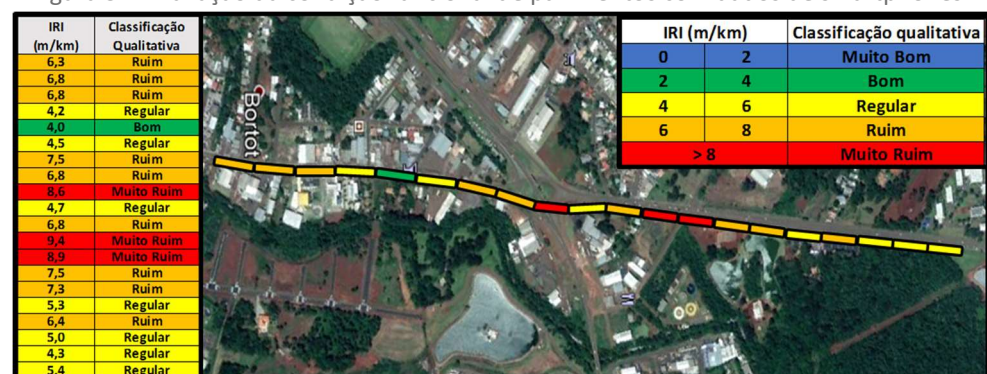
REPETITIVIDADE DO RMSVA

O número de coletas tende a afetar a correlação entre IRI e RMSVA. Em Bisconsini (2016), também se analisou a correlação entre essas variáveis. Naquela situação, utilizou-se um smartphone modelo Samsung Galaxy S5 Mini, um veículo da marca Volkswagen, modelo Gol G2 e um suporte do tipo antiderrapante. O IRI também foi obtido após medições em uma extensão total de 1500 metros de pavimentos, para uma média de 10 viagens. O Coeficiente de Variação (CV) obtido para as velocidades de 40 e 60 km/h foi de cerca de 5%. Para investigar essa situação, analisou a repetitividade do RMSVA coletado a partir de 5 e 10 viagens, realizadas em dias distintos. O CV médio obtido a partir de 10 viagens foi de cerca de 9% e 4% para as velocidades de 40 e 60 km/h, respectivamente, resultado próximo ao obtido em Bisconsini (2016), ambos melhores do que os resultados obtidos para apenas 5 viagens, os quais resultaram em um CV médio de 30%.

SIMULAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO DE CAMPO

Para simular uma aplicação do sistema (preliminar) desenvolvimento, realizou-se uma coleta em um segmento de rodovia no município de Pato Branco (PR), com início do trecho após cerca de 20 metros da mini-rotatória da Avenida Tupi, que faz ligação com a Rua Olavo Bilac, e segue pela Via do Conhecimento, de competência do DER/PR - Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (PR-493), em uma extensão de 2000 metros. A análise consistiu na classificação funcional do trecho, segmentado a cada 100 metros, como “Muito Bom”, “Bom”, “Regular”, “Ruim” e “Muito Ruim”, de acordo com uma classificação proposta para esse sistema, baseada em limites de IRI, como apresentada na Figura 3.

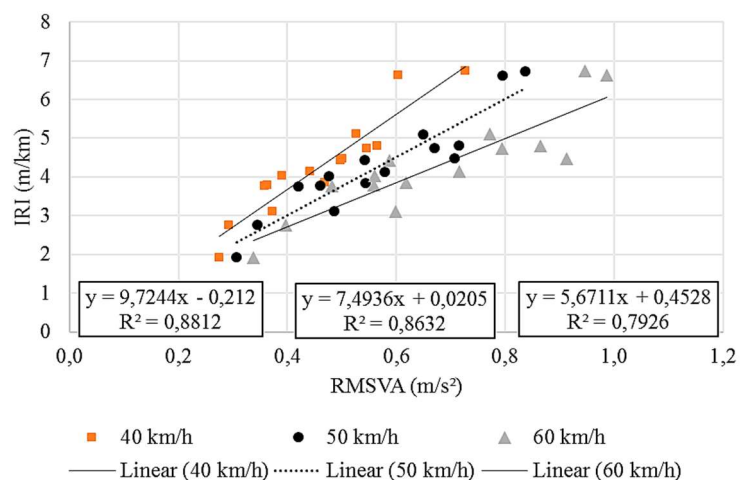
Figura 3 - Avaliação da condição funcional de pavimentos com dados de smartphones.



Fonte: Autoria própria (2019).

O IRI foi obtido a partir das acelerações verticais obtidas a velocidades entre 40 km/h e 60 km/h, estimadas por meio de curvas de correlação IRI-RMSVA, investigadas no processo de calibração. Para velocidades mais próximas de 50 km/h, utilizou-se a média do RMSVA obtida para as velocidades anteriores, para se obter uma terceira curva de calibração. As equações citadas, para a estimativa do IRI a partir dos dados do smartphone, são exibidas na Figura 7.

Figura 7 - Equações obtidas a partir da calibração de um sistema de medição de irregularidade a partir de dados de smartphones em diferentes velocidades.



Fonte: Autoria própria (2019).

CONCLUSÕES

Neste estudo, investigou-se a perspectiva de estimativa da condição funcional de pavimentos com dados de smartphones. A análise foi baseada no comparativo entre IRI, obtido a partir do método de Nível e Mira, e o RMSVA (*Root Mean Square of Vertical Acceleration*), calculado com as acelerações verticais medidas por um smartphone embarcado em veículo. Os resultados apontam que coletas a velocidades menores podem resultar em uma menor correlação entre IRI e RMSVA quando não há tratamento dos dados para reduzir efeitos indesejados de ruídos, causados principalmente pelas vibrações do motor, analisadas em testes de rotações com diferentes tipos de suportes. O suporte do tipo painel foi o que apresentou os maiores níveis de ruído, enquanto o do tipo para-brisas sem apoio no painel apresentou os menores. Para atenuar esse efeito, aplicou-se um filtro de Fourier passa-faixa (0,2-25 Hz), o qual proporcionou um aumento da correlação IRI-RMSVA. Em relação à repetitividade do RMSVA, observou-se que o Coeficiente de Variação (CV) diminuiu de cerca de 30%, para de 5 viagens de coleta, para 4 a 9%, para 10 viagens de coleta, o que indica que um maior número de viagens pode ser positivo para o aumento da precisão de estimativa do IRI quando da realização do processo de calibração do sistema veículo-montagem-smartphone-velocidade.

Conclui-se que a avaliação funcional de pavimentos com dados de smartphones é viável para a alimentação de bancos de dados de um SGP. Até o momento, o método é baseado no conceito dos sistemas medidores de irregularidade do tipo resposta. Por esse motivo, sugere-se que a calibração seja realizada por órgãos rodoviários em datas próximas de avaliações oficiais, as quais ocorrem esporadicamente, seja por questões técnicas ou orçamentárias, como do levantamento da irregularidade ou avaliações subjetivas. O sistema pode ser utilizado durante as fiscalizações de rotina dos órgãos, o que proporcionaria o acompanhamento contínuo da condição das rodovias e a definição de trechos com condições prioritárias de manutenção (nível de rede) ou o pedido de avaliações complementares em segmentos específicos (nível de projeto).

REFERÊNCIAS

BISCONSINI, D. R. Avaliação da Irregularidade Longitudinal dos Pavimentos com Dados Coletados por Smartphones. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP). São Carlos, SP. 2016.

DNER-ES 173/86. Método do Nível e Mira para Calibração de Sistemas Medidores de Irregularidade Tipo Resposta. Ministério dos Transportes. 1986.

SAYERS, M. W. E S. M. KARAMIHAS. The little book of profiling. Ann Arbor: Transportation Research Institute, University of Michigan, USA. 1998.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio técnico do DER, DNIT e Depatran, e a concessão de bolsa e auxílio financeiro fornecidos pela Pró-Reitoria de Relações Empresariais e Comunitárias (PROREC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).