

Avaliação da irregularidade longitudinal do pavimento sobre pontes usando acelerações medidas por *smartphones*

Betina Knebel Muliterno¹, Fernando Muliterno Junior², Zacarias Martin Chamberlain Pravia³

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, UPF, be.muliterno@hotmail.com

²FBM Engenharia e Consultoria, f_muliterno@yahoo.com.br

³Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, UPF, zacarias.chamberlain@gmail.com

Recebido:

15 de maio de 2018

Aceito para publicação:

25 de março de 2019

Publicado:

31 de agosto 2019

Editor de área:

Jorge Barbosa Soares

Palavras-chaves:

Irregularidade do Pavimento;

Smartphone;

Pontes;

Vibrações.

Keywords:

Pavement Roughness;

Smartphone;

Bridges;

Vibrations.

DOI:10.14295/transportes.v27i2.1686



RESUMO

O objetivo deste trabalho foi obter o Índice de Irregularidade Internacional (IRI) de pavimentos sobre pontes utilizando *smartphones*, estes equipados com acelerômetros, possibilitando a aquisição de dados de aceleração e a determinação da irregularidade através de procedimentos numéricos, consistindo na dupla integral dos dados de aceleração vertical. Foram realizadas medições em três pontes, por meio de um veículo percorrendo as mesmas, equipado com dois telefones móveis diferentes com taxa de aquisição de 100 Hz. Um dos dispositivos foi disposto no interior do veículo e outro na bandeja do sistema de suspensão. Utilizou-se outra abordagem, o Método de Nível e Mira, para a calibração da medição do tipo resposta nas pontes. As conclusões mostram uma boa convergência entre os métodos apresentados para obtenção de perfis de superfície de pontes, demonstrando bom indício do uso dos *smartphones* como método alternativo simples e econômico, revelando fácil operação e boa produtividade.

ABSTRACT

The objective of this research was to obtain International Roughness Index (IRI) for pavements on bridges using smartphones, equipped with accelerometers, enabling the acquisition of acceleration data and the determination of the irregularity by numerical procedures, consisting of double integration of vertical acceleration. Measurements were made on three bridges, by crossing vehicles, equipped with two mobile phones with 100 Hz acquisition rate. One of the devices was arranged inside the vehicle and another in the suspension system tray. Rod and level approach was used to validate the proposal. The conclusions show a good convergence between the methods presented to obtain bridges surface profiles, showing good indication of the use of smartphones as a simple and economical alternative method, revealing easy operation and good productivity.

1. INTRODUÇÃO

O usuário de uma rodovia tende a avaliá-la durante seu percurso, sendo esta avaliação subjetiva e realizada de modo visual e, também, pela possibilidade de aceleração que este pavimento irá permitir o condutor empregar (Bisconsini *et al.*, 2018).

Estimar a ação que um pavimento com um maior nível de degradação possa vir a ter na dinâmica das obras de arte e prever a relação entre o estado do pavimento com o desenvolvimento de defeitos neste tipo de estrutura é uma importante linha de pesquisa. O efeito dinâmico causado pela passagem de veículos sobre a via se amplifica aos arredores das irregularidades, acelerando assim a deterioração (FERNANDES JR. & BARBOSA, 2000).

Investigar o potencial de *smartphones* para a mensuração da irregularidade longitudinal dos pavimentos é uma importante linha de pesquisa, tendo em vista que, embora haja um número

crescente de trabalhos internacionais acerca do tema, ainda restam dúvidas sobre a qualidade e a forma de aplicação dos sinais obtidos por esta metodologia.

Em suma, o trabalho atual visa, por meio da aplicação de equipamentos de baixo custo, no caso *smartphones*, avaliar o pavimento asfáltico aplicado sobre obras de artes especiais, através da determinação do IRI com base nos deslocamentos obtidos por meio da dupla integral dos dados de aceleração vertical.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

A qualidade de um pavimento é normalmente associada à percepção desenvolvida pelo motorista ao se deslocar sobre um trecho considerado. A irregularidade que afeta a percepção do motorista está também associada às questões de segurança dos usuários e da condição dos pavimentos, pontes ou viadutos que recebem as cargas do tráfego.

O DNER (1994) define irregularidade como o desvio da superfície em relação a um plano de referência, o qual afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade de rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via. O DNIT (2011) define de forma semelhante a irregularidade longitudinal, fazendo referência também à capacidade de drenagem superficial da via.

O problema considerado é a qualidade da superfície do pavimento, designado pelo perfil longitudinal do trecho desejado. Segundo Bernucci *et al.* (2010), os danos da superfície do pavimento podem estar ligados a diferentes causas, entre elas os erros de projeto do pavimento, na seleção, dosagem e produção dos materiais, defeitos construtivos bem como a adoção de atividades de conservação e manutenção equivocadas. A justificativa, conforme Barella (2008), é que a irregularidade longitudinal do pavimento está relacionada à vida útil do pavimento e aos custos operacionais dos veículos.

2.1. Uso de *smartphones* para a avaliação da irregularidade do pavimento

Pesquisas vêm implementando o emprego de *smartphones*, a exemplo de Lakušić, Brčić & Lakušić (2011), que avaliaram diversos padrões de pavimentos. Os autores, em resposta aos ensaios experimentais, obtiveram uma simples apuração das vibrações que o veículo era exposto e, concomitantemente a isto, coletavam respostas por parte de um perfilógrafo inercial a *laser* que permitia a determinação do IRI. Foi possível estabelecer uma correlação entre ambos, sendo que o *smartphone* possibilitou identificar as irregularidades do pavimento, mesmo pequenas fissuras (inferiores a 25 mm). Contudo, os autores desaprovam a instalação do acelerômetro no interior do veículo indicando que, para uma correta leitura o suporte da roda dianteira é o mais indicado.

Douangphachanh & Oneyama (2014) seguindo a mesma analogia do anterior, dispuseram *smartphones* no interior do veículo em locais onde possivelmente um passageiro os acomodaria. Os autores sugerem a aplicação do filtro passa-alta (do inglês: *High Pass Filter*) com intuito de atenuar a amplitude das frequências abaixo da frequência de corte adotada, estas desenvolvidas durante os procedimentos de manobra, desaceleração, frenagem, entre outros.

Pravia e Braido (2015), diferente dos demais, propuseram uma forma de inspecionar obras de arte especiais com o auxílio de *smartphones* e dos componentes que o compreendem como acelerômetros. Foi possível, através da análise experimental e numérica, averiguar a frequência natural de vibração de pontes e viadutos que compõem a superestrutura, agregando os resultados à inspeção visual e deixando a subjetividade de lado.

Islam *et al.* (2014) voltando a relacionar o uso de *smartphones* com a avaliação de pavimentos, procuraram confeccionar seu próprio aplicativo coletor de dados de aceleração vertical sendo este em base *Android* e denominado *Roughness Capture*. O aplicativo permite uma taxa de aquisição variando entre 10 e 100 Hz. Como resultados, encontrou-se uma similaridade nos índices estimados por cada uma das metodologias, concluindo assim que a suspensão do veículo possa ter interferido em uma melhor correlação.

Bisconsini *et al.* (2018) averigaram a qualidade dos sinais de aceleração vertical de três diferentes *smartphones*, tendo como finalidade constatar a capacidade de resposta dos telefones móveis quando comparados com um acelerômetro piezoelétrico, equipamento mais sofisticado e de maior custo em relação aos demais. A comparação foi realizada através do algoritmo desenvolvido por Slifka (2004), que nada mais é que a realização de duas integrais necessárias ao cálculo dos deslocamentos. Cabe ressaltar que o próprio algoritmo aplica filtros passa-alta anterior e posterior à realização destas integrais, procedimento necessário devido à simplicidade dos acelerômetros, podendo acarretar em interferências, conhecidas como ruídos.

Segundo Slifka (2004), os acelerômetros são utilizados para converter aceleração em um sinal elétrico, porém apresentam um fenômeno indesejado chamado *drift*, causado por erros na captação dos sinais de aceleração. Se o sinal de aceleração vertical foi integrado sem a utilização de qualquer filtro, a resposta pode representar um fenômeno irreal em relação ao tempo.

Um estudo recente utilizou *smartphones* munidos de um aplicativo específico para avaliar a superfície de vias pavimentadas (Almeida *et al.*, 2018). Trataram-se de vias com revestimentos em concreto asfáltico, tratamento superficial e concreto de cimento Portland, por meio do aplicativo *Roadroid*, para o sistema *Android*. As características consideradas estão associadas à textura e aos defeitos de superfície. Os autores concluíram que os *smartphones* apresentam resultados semelhantes aos dados fornecidos pelos órgãos rodoviários e que segmentos com alto coeficiente de variação apresentam quantidades significativas de defeitos, sobretudo remendos e buracos.

2.2. Índice de Irregularidade Internacional (IRI)

A medição do perfil longitudinal do pavimento aplicado sobre as pontes pode fornecer informações sobre a irregularidade através do Índice de Irregularidade Internacional (IRI). O IRI é uma metodologia padronizada e é produto do *The International Road Roughness Experiment – IRRE*, realizado por pesquisadores do Brasil, Inglaterra, França, Estados Unidos e Bélgica.

Em relação às obras de arte, Deng *et al.* (2015) comentam que a irregularidade da superfície é o principal parâmetro que afeta o fator de impacto – o qual multiplica as cargas estáticas para que os efeitos dinâmicos sejam considerados na análise estrutural destes elementos. Assim, manutenções regulares de superfície fornecem uma maneira efetiva de redução do fator de impacto das pontes existentes. Segundo Park *et al.* (2005), existe uma relação linear entre o IRI e o fator de impacto, ou seja, ao aumentar o valor do IRI ocorre um aumento também no fator de impacto.

Conforme o DNIT (2011), a irregularidade longitudinal é o somatório dos desvios da superfície de um pavimento em relação a um plano de referência ideal de projeto geométrico, que afeta a dinâmica dos veículos, o efeito dinâmico das cargas, a qualidade ao rolamento e a drenagem superficial da via.

Entre as metodologias existentes para estimativa do IRI citam-se o Método Nível e Mira, Per-

filógrafo e o Perfilômetro Inercial a Laser, este último tratando-se de um equipamento que possui um componente inercial (acelerômetro medidor da aceleração vertical), destinado à compensação dos movimentos verticais do veículo (BARELLA, 2008).

Contudo, o modelo mais utilizado para a avaliação do IRI é um sistema de suspensão de um veículo conhecido como modelo de um quarto de carro (do inglês *Quarter-car*), no qual apenas $\frac{1}{4}$ do veículo é considerado. O modelo é bidimensional por considerar os movimentos na direção Z, constituído basicamente de uma única roda (DU *et al.*, 2014).

Neste modelo, as massas com e sem amortecimento correspondem a $\frac{1}{4}$ do veículo e são designadas por m_s e m_u , respectivamente. O sistema de suspensão é representando por uma mola linear de rigidez k_s , um amortecedor linear com um amortecimento c_s , o pneu por uma mola linear de rigidez k_t e Y representa os dados de entrada (Figura 1).

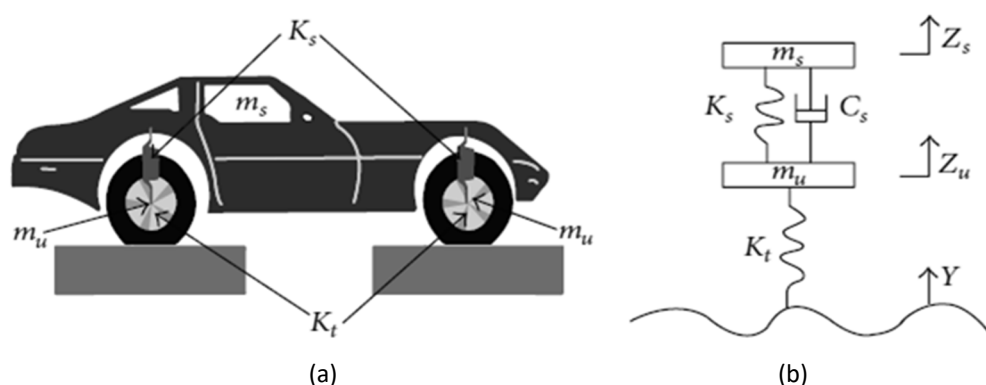


Figura 1: Modelo *Quarter-car*: a) Representação no veículo e b) Simplificação do modelo (DU *et al.*, 2014).

Existem quatro classes genéricas para a medição direta do IRI, as quais afetam as exigências de calibração e a precisão associadas ao uso: Classe 1, Classe 2, Classe 3 e Classe 4 (SAYERS *et al.*, 1986).

A Classe 1 engloba perfis de precisão, representando o maior padrão de precisão para as medições do IRI. A Classe 2 abrange os métodos perfilométricos que incluem todos as outras metodologias que não atingem a precisão necessária para a Classe 1.

A Classe 3 realiza a estimativa do IRI por meio de equações de correlação. A maioria dos dados de irregularidade dos pavimentos pertence a esta classe, conhecida também como RTRRMS (do inglês *Response-Type Road Roughness Measuring Systems*). As medições RTRRMS dependem da dinâmica do veículo, que são únicas para cada veículo, e que variam em relação ao tempo. A Classe 4 refere-se as avaliações subjetivas.

Em situações onde são necessários dados de irregularidade sem precisão pode-se utilizar esta metodologia, porém, ainda assim, é adequado relacionar as medições à escala IRI. A Tabela 1 apresenta a relação entre a condição do pavimento e o IRI.

Tabela 1: Relação entre a condição do pavimento e o IRI (m/km) (adaptada de DNIT, 2006).

Condição do Pavimento	IRI (m/km)
Excelente	1,0 – 1,9
Bom	1,9 – 2,7
Regular	2,7 – 3,5
Ruim	3,5 – 4,6
Péssimo	> 4,60

3. EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

Para o caso deste trabalho, três obras de arte foram levadas em consideração (Figura 2), situadas na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul, sendo suas características e localização expostas na Tabela 2. As pontes foram submetidas a testes onde, com o auxílio de dois *smartphones* e um veículo automotor, tiveram as acelerações registradas por meio de um aplicativo para o sistema *Android*, sincronizadas através do horário, sendo um acelerômetro posicionado na bandeja dianteira do veículo (suspensão) e outro no interior do mesmo. Utilizou-se o Método de Nível e Mira para a calibração da medição do tipo resposta, conforme DNER (1986). O programa experimental bem como os resultados e conclusões do atual estudo são apresentados a seguir.

Tabela 2: Características das pontes avaliadas.

Ponte	Rio	Extensão	Localização	Coordenadas
P1	Rio Santa Rita	58,6 m	BR 285 – Km 172,10	-28.323197, -51.337105
P2	Rio Lajeado dos Ivos	120,0 m	BR 470 – Km 70,70	-28.153677, -51.513777
P3	Rio Passinho Fundo	34,35 m	BR 285 – Km 203,40	-28.211218, -51.561696



Figura 2: Obras de arte avaliadas: a) Ponte 1; b) Ponte 2 e, c) Ponte 3.

O principal objetivo deste estudo é permitir a avaliação do pavimento em pontes de maneira que esta possa ser realizada com um custo mínimo, facilitando o emprego da metodologia. Para isto foi utilizado um automóvel da marca FIAT modelo Palio 1.0V ano 2012. Quanto aos *smartphones*, estes eram de modelo diferente entre si, devido à disponibilidade para a pesquisa. É possível que este fato apresente certa influência nos resultados finais, porém não em grande importância, tendo em vista que ambos os *smartphones* estavam programados para uma taxa de aquisição de 100 Hz, utilizando o aplicativo *Accelerometer Analyzer*, disponível gratuitamente para sistemas *Android*.

O procedimento de ensaio consistiu em transitar sobre as pontes, com velocidade média de 40 km/h.. Cabe ressaltar que com uma taxa de aquisição de 100 Hz, é possível obter dados de aceleração a cada 11 cm. Quanto a horizontalidade dos *smartphones*, os mesmos possuem equipamentos que permitem a leitura do seu ângulo. Considerando que não excedeu 3 graus, pode ser considerado que o mesmo estava na posição horizontal. Para o acelerômetro, conforme informações específicas do aparelho e aplicativo, as leituras foram feitas no eixo Z.

A instalação dos *smartphones* se deu de maneira manual. Os locais adotados para instalação tiveram como base o estudo de Lakušić, Brčić e Lakušić (2011), sendo que o primeiro acelerômetro denominado A1 (Samsung Galaxy J3) teve sua instalação na bandeja externa na parte frontal do veículo, próximo à roda, local este que recebe pouca influência por parte do sistema de amortecimento do veículo. Já o segundo acelerômetro, denominado A2 (Motorola Moto G5),

foi posicionado no interior do veículo, próximo ao assento do passageiro, fixo no chão. A instalação pode ser visualizada na Figura 3.



Figura 3: Acelerômetro A1 na bandeja externa da roda dianteira e Acelerômetro A2 no interior do veículo.

Quando o objetivo é obter os deslocamentos através da dupla integral dos sinais de aceleração vertical, podem-se seguir os seguintes passos (Slifka, 2004) (Figura 4): 1º) Aplicação do filtro, a fim de remover os desvios do acelerômetro; 2º) Primeira integral sobre os valores de aceleração, obtendo a velocidade; 3º) Segunda aplicação do filtro, a fim de remover componentes de amplitude média do sinal de velocidade; 4º) Segunda integral sobre os valores de velocidade, obtendo os deslocamentos; 5º) Terceira aplicação do filtro, eliminando os sinais de baixa frequência a partir dos deslocamentos e eliminando a necessidade de posição inicial.

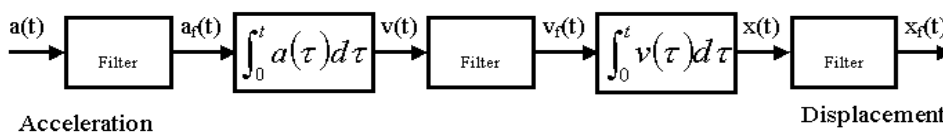


Figura 4: Resumo do método e tratamento dos dados (Adaptado de Slifka, 2004).

Uma opção de filtro que pode ser aplicado é o de média móvel (*moving average*), sendo o filtro mais utilizado no processamento de sinais digitais devido a sua facilidade de aplicação, operando através da média sobre um número de pontos de entrada de um sinal (Smith, 1999), podendo ser obtido através da equação (1):

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i + j] \tag{1}$$

- em que M: número de pontos considerados (número ímpar);
- i+j: é o intervalo de dados considerados;
- x: dados de entrada;
- y: dados de saída.

Com o objetivo de calibrar as medições do tipo resposta, foi realizado o levantamento topográfico do perfil longitudinal através do Método Nível e Mira (Figura 5), este sendo o mais conhecido no âmbito internacional. Este tipo de procedimento, regulamentado pelo DNER (1986), pode ser citado como um método demorado e trabalhoso. O levantamento longitudinal deve ser realizado nas trilhas de roda interna e externa, sendo o espaçamento entre leituras de 0,50 metros.

Com a finalidade de comparar os resultados obtidos através da utilização dos acelerômetros no interior e no exterior do veículo e o Método Nível e Mira, optou-se pela aplicação do software de análise de pavimentos, ProVal (The Transtec Group, 2017) para o cálculo do IRI.

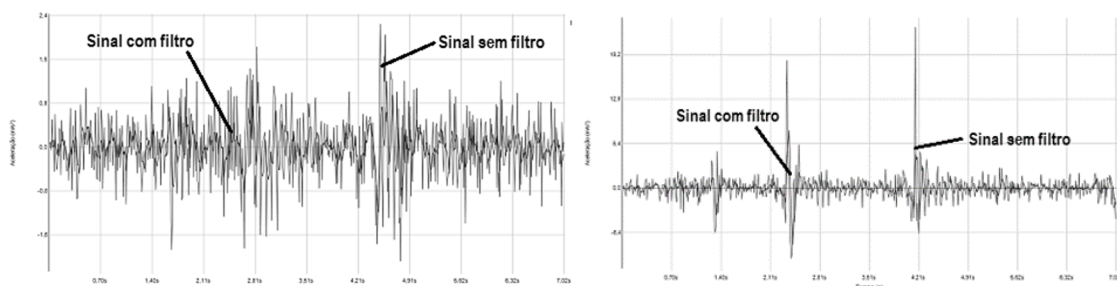


Figura 5: Execução do Método de Nível e Mira na Ponte 3.

4. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DAS VIBRAÇÕES

Os gráficos apresentam os resultados obtidos com a avaliação experimental das três obras de arte escolhidas, sendo a aceleração vertical apresentada pelo aplicativo em m/s^2 e a taxa de aquisição estipulada em 100Hz. Foi empregada uma planilha de cálculo (Microsoft Excel) para a realização da dupla integral, bem como aplicação do filtro de média móvel (com um intervalo de 5 pontos para realizar a média).

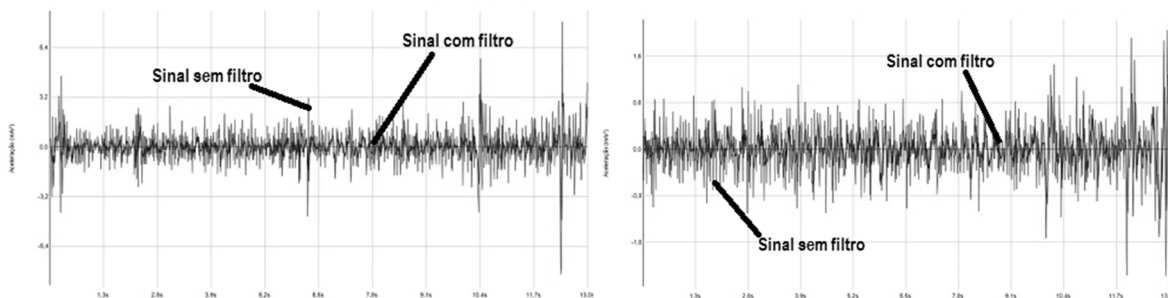
As integrais foram realizadas, também, com o programa Scilab 6.0, para verificação dos resultados. As medições realizadas neste trabalho são consideradas Classe 3 sem calibração. As Figuras 6 e 7 apresentam os resultados obtidos para as acelerações e deslocamentos após os procedimentos numéricos.



I. Ponte 1

(a)

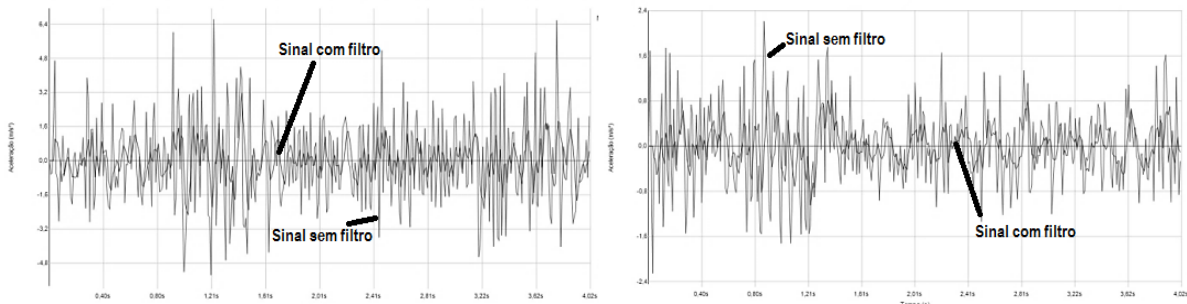
(b)



II. Ponte 2

(a)

(b)

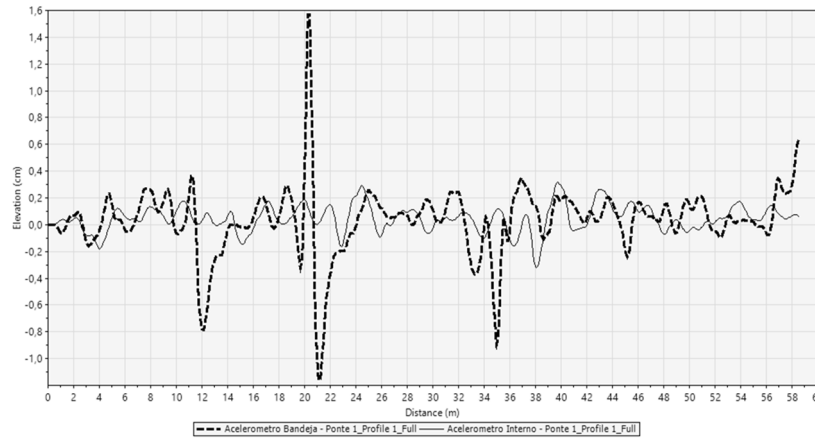


III. Ponte 3

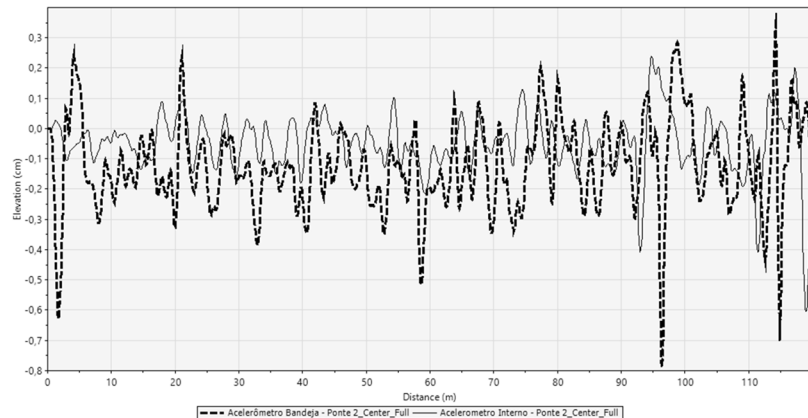
(a)

(b)

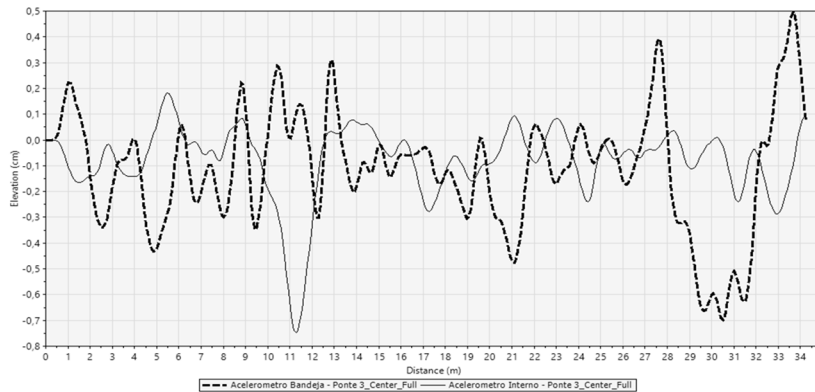
Figura 6: Sinal de Aceleração x Tempo: a) acelerômetro 1 (suspensão) e b) acelerômetro 2 (interior).



(a)



(b)



(c)

Figura 7: Perfil relativo através dos dois acelerômetro e cálculo do IRI pelo ProVal: a) Ponte 1; b) Ponte 2 e c) Ponte 3.

Quanto ao ensaio de calibração, a Figura 8 apresenta o resultado do perfil através do Método Nível e Mira, realizado para as três pontes. Observa-se que todas as pontes possuem um perfil em rampa ascendente.

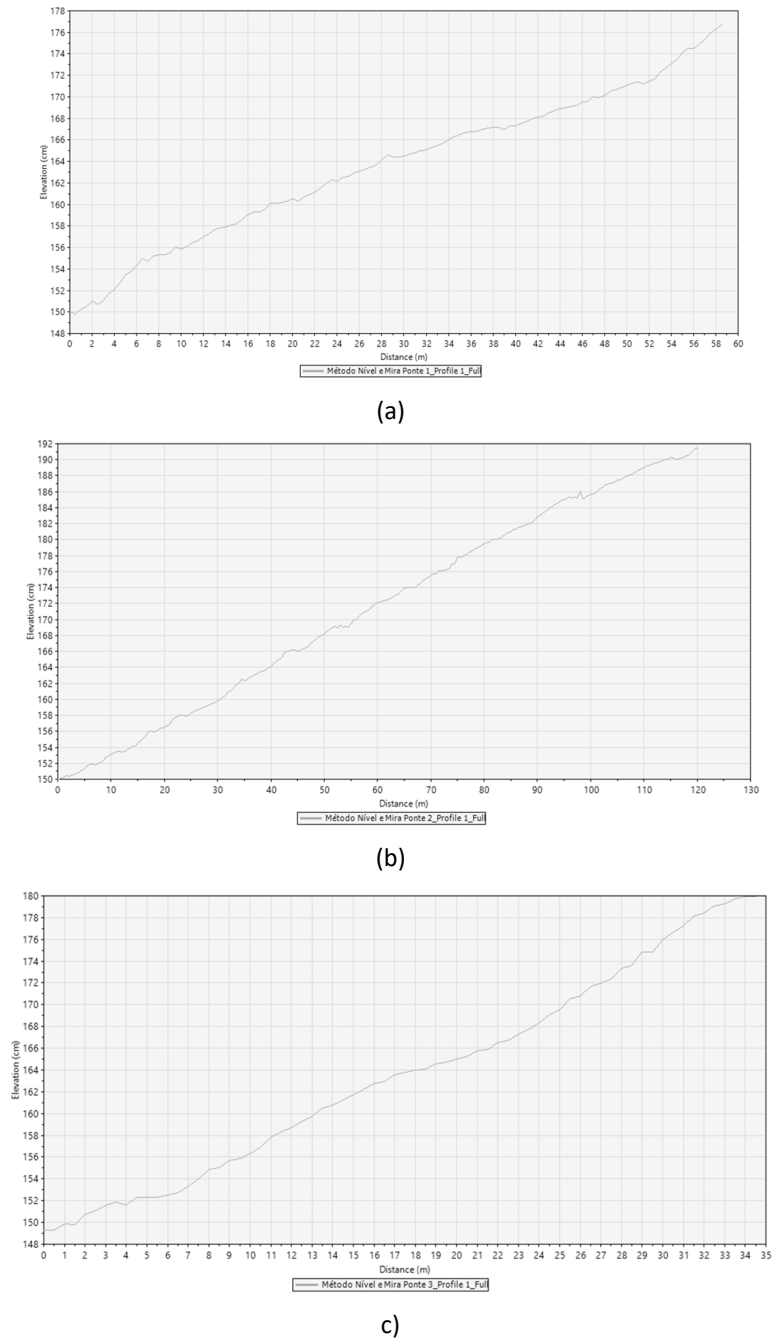


Figura 8: Perfil pelo ProVal para o Método Nível e Mira: Ponte 1; b) Ponte 2 e c) Ponte 3.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Conforme o objetivo inicial estipulado, foi possível obter, através de cálculos numéricos, o deslocamento, ou seja, a irregularidade sentida quando se trafega com o carro. Depois do tratamento dos sinais com o filtro, conforme indicado por Slifka (2004), sabe-se que com os dados de “Aceleração x Tempo”, em segundos, realiza-se a integral, obtendo a velocidade. Realizando novamente a integral, é possível encontrar o deslocamento.

Em se tratando da obtenção das características do perfil sabe-se que, conforme exposto por Bisconsini (2018), podem ocorrer ruídos ou influência da suspensão do veículo nos resultados encontrados. Deve-se comentar que não há problema na utilização do *smartphone* dentro do veículo, desde que o método seja calibrado, ou até mesmo utilizado um aplicativo específico.

Pode-se afirmar que a maioria dos pavimentos pode visualmente ser classificada como em bom estado de conservação, ou seja, nenhum apresentou grandes defeitos, como buracos, por exemplo, o que pode ser percebido nos resultados de deslocamento apresentados, sendo todos muito baixos. A Tabela 3 classifica, em síntese, a condição do pavimento relacionada com o IRI e a Figura 10 apresenta o gráfico dos resultados obtidos.

Tabela 3: Classificação dos pavimentos das pontes analisadas de acordo com o IRI.

Ponte	Localização do Smartphone	IRI – ProVal (m/km)	Classificação
P1	Suspensão	4,32	Ruim
P1	Interior do veículo	2,03	Bom
P1	Método Nível e Mira	3,05	Regular
P2	Suspensão	2,70	Bom
P2	Interior do veículo	1,56	Excelente
P2	Método Nível e Mira	2,44	Bom
P3	Suspensão	3,83	Ruim
P3	Interior do veículo	2,38	Bom
P3	Método Nível e Mira	4,05	Ruim

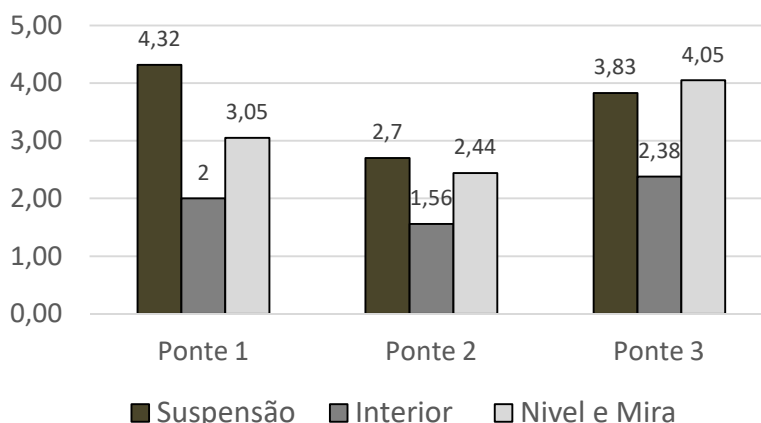


Figura 9: Resultados IRI (m/km): comparação dos resultados de IRI obtidos nos ensaios.

Analisando o gráfico apresentado para os sinais do Acelerômetro 1 e Acelerômetro 2, nota-se que os locais adotados para a instalação do *smartphone* exercem grande influência nos resultados. Deve-se comentar que a classificação do pavimento conforme o IRI calculado, no geral, representa de maneira coerente o que é analisado visualmente.

Da mesma forma, a Ponte 3 possuía um pavimento em boas condições, sem defeitos, e que oferecia conforto ao usuário que trafegava com o veículo. Entretanto, houve divergência encontrada quanto à classificação por cada método, o que ressalta a necessidade de maiores estudos comparativos.

Em três casos houve a classificação como estado ruim, inclusive existindo divergência entre o acelerômetro no interior do veículo e no exterior, bem como entre o Método Nível e Mira. Esse desencontro de valores pode estar associado aos seguintes fatores:

- a. Emprego de diferentes modelos de *smartphones*;

- b. Possíveis interferências durante a aquisição de sinais, como ruídos, por exemplo, que não foram removidos com os filtros;
- c. Provavelmente, os valores encontrados para o IRI a partir do acelerômetro na suspensão do veículo foram maiores, pois não existe o sistema de amortecimento presente como no interior do veículo.

6. CONCLUSÕES

É possível determinar a irregularidade do pavimento através dos dados obtidos pelos acelerômetros nos *smartphones*, e através de tais respostas, determinar as características do perfil do pavimento através da obtenção dos deslocamentos, por procedimentos numéricos.

Os resultados têm grande influência pelo filtro utilizado antes e após cada integração, sendo importante comentar que não é possível, e muito menos recomendado, utilizar essa técnica para avaliação da irregularidade sem a aplicação de algum filtro, devido aos ruídos presentes nos sinais.

Quanto à calibração através do Método Nível e Mira, deve-se ressaltar que o mesmo é um procedimento trabalhoso e demorado, sendo inconveniente realizá-lo sem o controle de tráfego, o que dificulta muito o ensaio.

A utilização de *smartphones* para a avaliação da irregularidade de pavimentos revela-se uma alternativa viável e rápida. Conclui-se que são necessários maiores estudos, podendo os resultados apresentados na presente pesquisa contribuir para trabalhos futuros no que diz respeito à utilização de *smartphones* como ferramenta de auxílio para o cálculo do IRI.

Algumas conclusões diretas fazem-se necessárias:

- a. Certamente há uma boa convergência entre os métodos apresentados para obtenção de perfis de superfície de pontes;
- b. A taxa de aquisição de 100 Hz empregada apresenta resultados adequados para obtenção de perfis;
- c. trabalho demonstra bom indício do uso dos *smartphones* como método alternativo simples e econômico para obtenção de perfis, revelando fácil operação e boa produtividade.
- d. A comparação entre os diferentes métodos aplicados neste trabalho ressalta a ideia de que as tecnologias mais avançadas não impedem a utilização das tradicionais e comprovadamente eficazes por longos anos, como é o caso do Método de Nível e Mira.

REFERÊNCIAS

- Android Application, *Accelerometer Analyzer* (2017) Google Play Store.
- Almeida, L. C.; Oliveira, F. H. L. e Ramos, S. L. (2018) *Estudo da condição de superfície em rodovias por meio do uso de aplicativo para smartphone*. Transportes, v. 25, n.2, ISSN: 2237-1346. DOI:10.14295/transportes.v25i2.1406.
- Barella, M, R. (2008) *Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-31032008-172407/pt-br.php>> (acesso em 21/08/2019).
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P. e Soares, J. B. (2010) *Pavimentação asfáltica – Formação básica para engenheiros*. Petrobras. Rio de Janeiro.
- Biconsini, D.; Nuñez, J. Y. M.; Nicoletti, R.; Fernandes Jr. e J. L. (2018) *Pavement Roughness Evaluation with Smartphones*. International Journal of Science and Engineering Investigations, Volume 7, Issue 72. ISSN: 2251-8843, Paper ID: 77218-07.
- Deng, L.; Yu, Y.; Zou, Q. e Cai, C.S. (2015) *State-of-the-Art Review of Dynamic Impact Factors of Highway Bridges*. Journal Bridge Engineering. V. 5, p. 1-14. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000672.
- DNER (1986) *Método do Nível e Mira para Calibração de Sistemas Medidores de Irregularidade Tipo Resposta*. Departamento Nacional De Estradas De Rodagem. DNER-ES 173/86. Ministério dos Transportes, Espírito Santo.
- DNER (1994) *Medição da irregularidade de superfície de pavimento com sistemas – Procedimento*. Departamento Nacional De Estradas De Rodagem. DNER-PRO 182/94. Ministério dos Transportes.

- DNIT (2011) *Manual de gerência de pavimentos*. Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes, Instituto de pesquisas rodoviárias, Publicação 745, Rio de Janeiro.
- DNIT (2006) *Manual de restauração de pavimentos asfálticos*. Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. Rio de Janeiro, 2006.
- Douangphachanh, V., Oneyama, H. (2014) *A study on the use of smartphones under realistic settings to estimate road roughness condition*. EURASIP: Journal on Wireless Communications and Networking, v. 114, 1-11. DOI:10.1186/1687-1499-2014-114.
- Du, Y; Liu, C; Wu, D; Jiang, S. (2014) *Measurement of International Roughness Index by Using 3-Axis Accelerometers and GPS*. Mathematical Problems in Engineering, v. 2014, p.1-10. DOI: 10.1155/2014/928980.
- Fernandes Jr, J. L., Barbosa, R. E. (2000) *Estimativa das Cargas Dinâmicas dos Veículos Rodoviários que Atuam Sobre os Pavimentos e Pontes*. Transportes, v. 8, 32-50. DOI: 10.14295/transportes.v8i2.187.
- Islam, S., Buttler, W., Aldunate, R., Vavrik, W. (2014) *Measurement of Pavement Roughness Using Android-Based Smartphone Application*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2457, 30-38. DOI: 10.3141/2457-04.
- Lakušić, S., Brčić, D., Lakušić, V. T. (2011) *Analysis of Vehicle Vibrations – New Approach to Rating Pavement Condition of Urban Roads*. Promet – Traffic&Transportation. V. 23, 2011, No. 6, 485-494.
- Park et al. (2005) *Influence of road surface roughness on dynamic impact factor of bridge by full-scale dynamic testing*. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 32, p. 825-829. DOI: 10.1139/105-040.
- Paterson, William D. O. (1987) *Road deterioration and maintenance effects: models for planning and management*. The highway design and maintenance standard series. The World Bank. Washington.
- Pravia, Z. M. C.; Braido, J. D. (2015) *Measurements of bridges' vibration characteristics using a mobile phone*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, [s.l.], v. 8, n. 5, p.721-743. DOI: 10.1590/S1983-41952015000500009.
- Sayers, W, M; Gillespie, D, T; Paterson, O, D, W. (1986) *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements*. World Bank Technical Paper Number 46, World Bank, Washington, D. C, USA.
- Slifka, L. D. (2004) *An Accelerometer Based Approach to Measuring Displacement of a Vehicle Body*. Dissertation – Of Graduate Studies of the University of Michigan, University of Michigan Department of Electrical and Computer Engineering, Dearborn.
- Smith, W, S. (1999) *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. Ed. 2, California Technical Publishing. ISBN 0966017668.
- The Transtec Group. (2017) *Proval - View and analyze pavement profiles*. In cooperation with FHWA.