

ANÁLISE DE FATORES RELACIONADOS AO USO DE SMARTPHONES PARA A AVALIAÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS

Danilo Rinaldi Bisconsini

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos

Jakeline Loureiro

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

José Leomar Fernandes Júnior

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO

A irregularidade longitudinal de pavimentos é um dos principais parâmetros de desempenho de rodovias rurais, afetando a qualidade de rolamento e os Custos Operacionais dos Veículos (COV). Na busca por sistemas de medição práticos e de baixo custo, têm-se estudado a associação de acelerações verticais e coordenadas geográficas fornecidas por smartphones com a irregularidade longitudinal. Investigou-se a relação entre o IRI (*International Roughness Index*) e os dados de smartphones embarcados em veículos. Realizaram-se testes com a variação de veículos, smartphones, suportes e número de coletas. Verificou-se a influência de ruídos e a atenuação de seus efeitos pela aplicação de filtros digitais. A análise de repetitividade apresentou resultados, em termos de coeficiente de correlação de Pearson, entre 0,7 a 0,9, e coeficiente de variação médio de 5 a 10%. Conclui-se que os smartphones podem ser utilizados de maneira eficaz para o monitoramento da irregularidade longitudinal de pavimentos.

ABSTRACT

The longitudinal pavement roughness is one of the main performance parameters of rural highways, affecting rolling quality and Vehicle Operating Costs (VOC). In the search for practical and low-cost measurement systems, researchers have investigated the association of vertical accelerations and geographic coordinates, provided by smartphones, with pavement longitudinal roughness. The relationship between IRI (*International Roughness Index*) and data from smartphones boarded in vehicles was investigated. Tests were carried out with the variation of vehicles, smartphones, supports and number of collections. The influence of noise and the attenuation of its effects by the application of digital filters was verified. The repeatability analysis showed results, in terms of Pearson's correlation coefficient, between 0.7 to 0.9, and a mean variation coefficient of 5 to 10%. It is concluded that smartphones can be effectively used to monitor the longitudinal pavement roughness.

1. INTRODUÇÃO

A frequência de monitoramento das rodovias é imprescindível 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 previsão de desempenho. A partir desses dados, busca-se a melhor estratégia quanto aos 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 o nível irregularidade, representado principalmente pelo IRI (*International Roughness Index*), é um dos parâmetros mais apropriados para a obtenção dos Custos Operacionais dos Veículos (COV), da qualidade de rolamento global, dos danos provocados pela carga dinâmica das rodas de veículos, dos limites de segurança para manobras em curvas e frenagens e pelas características de irregularidade de superfície que afetam a resposta dos veículos (Sayers e Karamihas, 1998).

De acordo com Sayers *et al.* (1986), os medidores de irregularidade são classificados em quatro classes, conforme o intervalo de amostragem e a forma de medição do IRI. Os sistemas da classe 1 medem o perfil de pavimentos de forma direta, com alta acurácia (e.g. Nível e Mira, Dipstick, perfilômetro do TRL - *Transportation Research Laboratory*, perfilômetro da ARRB

- *Australian Road Research Board*). A classe 2 inclui outros métodos perfilométricos (e.g. sensores a laser, infravermelho ou ultrassom, APL francês - *Longitudinal Profile Analyser*). Métodos estáticos são demorados para levantamentos de grandes extensões, como exigido pela gerência em nível de rede, enquanto que os sistemas sofisticados (e.g. perfilômetros inerciais a laser e scanner) apresentam alto custo de aquisição, operação e processamento de dados.

Os equipamentos da classe 3 são conhecidos como medidores do tipo resposta (e.g. Integrador IPR/USP, *Maysmeter*, MERLIN, *TRL Bump Integrator*). Tais sistemas não medem o perfil dos pavimentos e só possibilitam a obtenção do IRI após serem calibrados a partir de medições de referência. A norma brasileira indica a calibração de medidores do tipo resposta por meio do método de Nível e Mira (DNER-ES 173/86), que demanda o uso de vinte trechos de calibração (bases) de 320 metros, com um intervalo de amostragem de 50 cm. Estima-se que o tempo necessário para o processo de calibração seja de um a dois meses (Bisconsini, 2016). A classe 4 compreende as avaliações subjetivas (painel de avaliadores). Neste grupo, os Levantamentos Visuais Contínuos (LVC) e a Avaliação da Serventia Atual (VSA) apresentam como principal desvantagem a subjetividade da avaliação e a necessidade de equipes treinadas para o serviço.

Recentemente, tem-se discutido o uso de smartphones para o monitoramento de pavimentos. Boa parte dos estudos é baseada no uso das acelerações verticais para a estimativa da irregularidade longitudinal. Alguns autores investigaram a possibilidade de cálculo direto do IRI (Douangphachanh e Oneyama, 2014; Buttlar e Islam, 2014; Hanson *et al.*, 2014; Jones e Forslof, 2015; Almeida *et al.*, 2017; Almeida, 2018), enquanto outros analisaram a correlação entre o IRI e as acelerações (Bisconsini, 2016; Laubis *et al.*, 2017; Aleadelat *et al.*, 2018; Thiandee *et al.*, 2019). Além do baixo custo, os smartphones possuem acelerômetros, giroscópios e GPS, o que dispensa a necessidade de cabos e outros dispositivos na coleta de dados. Também podem fornecer mapas temáticos em uma plataforma SIG (Sistemas de Informações Geográficas), o que facilita a visualização e análise de segmentos críticos de intervenção. O principal desafio consiste na definição de um sistema que apresente, além de praticidade e baixo custo, confiabilidade, o que depende da investigação dos fatores que podem afetar a qualidade dos dados obtidos.

2. MÉTODO

Para analisar a relação entre os dados de smartphones e o IRI, foram realizados levantamentos topográficos, com Nível e Mira, em trechos de 100 metros, em um total de 1500 metros. Foram selecionados cinco segmentos localizados no município de Pato Branco (PR): via de acesso de uma empresa local (SG), rua Benjamim Borges (BB), Avenida da Inovação (AI), rua Irineu Parzianello (IP) e Via do Conhecimento (PR-493). 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, obteve-se o IRI dos segmentos selecionados. O índice foi calculado a partir da média aritmética do IRI obtido para as trilhas de rodas externas e internas de cada trecho.

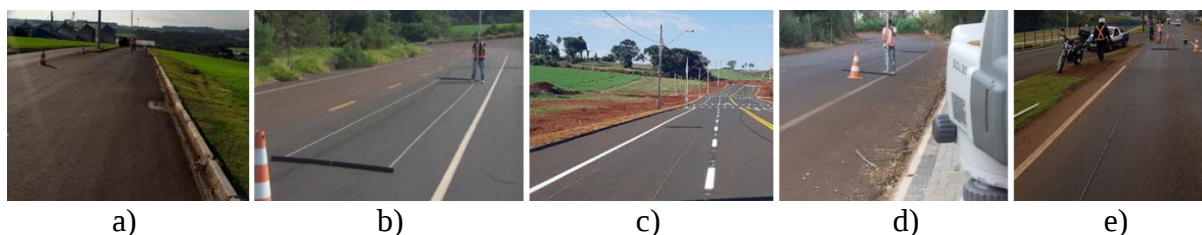


Figura 1: trechos rodoviários utilizados na pesquisa: a) SG; b) BB; c) AI; d) IP; e) PR.

Nos mesmos trechos onde se obteve o IRI, foram coletados sinais de aceleração verticais fornecidos por smartphones embarcados em veículos, a uma taxa de aquisição de 200 Hz (dados por segundo) e coordenadas do GPS a uma taxa de 1 Hz. Para verificar como a relação entre o IRI e os dados gerados pelos smartphones poderiam variar com as condições de levantamento, foram realizadas coletas em diferentes cenários: (1) com três modelos de smartphones, (2) três modelos de veículos, (3) três tipos de montagem e (4) duas velocidades. Os tipos de montagem se referem à forma pela qual os smartphones foram fixados aos veículos (Figura 2).

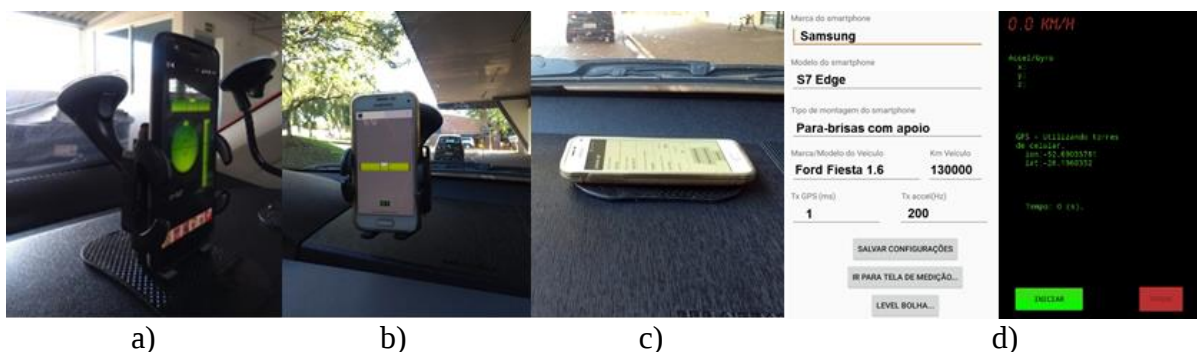


Figura 2: Tipos de suportes utilizados: a) para-brisas com apoio, b) para-brisas sem apoio e c) painel; e d) interface do aplicativo desenvolvido para a coleta dos dados.

Na Tabela 1 é apresentado um resumo dos cenários de coleta investigados, com os modelos de veículos, smartphones, tipos de montagem e velocidades analisadas.

Tabela 1: sequência* de cenários analisados

Variável Analisada			
Veículo	Smartphone	Montagem	Velocidade (km/h)
RM** - G4 - TA - 60	FF - G4** - TA - 60	FF - S5 - TA** - 0	EF - G4 - TA - 40**
FE** - G4 - TA - 60	FF - G5** - TA - 60	FF - S5 - PA** - 0	EF - G4 - TA - 60**
FF** - G4 - TA - 60	FF - Z2** - TA - 60	FF - S5 - PS** - 0	-

* as siglas da tabela seguem a sequência: veículo - smartphone - suporte - velocidade.

**Os modelos de veículos e smartphones não são divulgados. TA = Tapete Antiderrapante (Figura 2c); PA = Suporte para-brisas com apoio no painel (Figura 2a); PS = Suporte para-brisas sem apoio no painel (Figura 2b).

As acelerações verticais medidas com os smartphones foram utilizadas para o cálculo de valores médios de RMSVA (*Root Mean Square of Vertical Acceleration*), para 5 viagens de coleta cumpridas em cada segmento de 100 metros, como indicado na Equação 1.

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

Em que RMSVA: Raiz da Média Quadrática da Aceleração Vertical (m/s²);

a_{zi} : aceleração vertical no ponto i (m/s²); e

n : número de dados.

3. RESULTADOS

Na Tabela 2, apresenta-se o IRI obtido em cada segmento e a classificação funcional indicada pelo DNIT (2006). Os termos “Excelente”, “Bom”, “Regular”, “Ruim” e “Péssimo” foram modificados para “Muito Bom”, “Bom”, “Regular”, “Ruim” e “Muito Ruim”, respectivamente.

Tabela 2: IRI dos segmentos subdivididos em trechos de 100 metros.

Segmento	Trecho (m)	IRI (m/km)	Classificação DNIT (2006)
Via Sementes Guerra (SG)	0 - 100	3,8	Ruim
	100 - 200	4,0	Ruim
	200 - 300	3,8	Ruim
	300 - 400	2,8	Regular
	400 - 500	3,1	Regular
Rua Benjamin Borges (BB)	0 - 100	4,4	Ruim
	100 - 200	3,8	Ruim
Avenida da Inovação (AI)	0 - 100	1,9	Muito Bom
Rua Irineu Parzianello (IP)	0 - 100	4,8	Muito Ruim
	100 - 200	6,7	Muito Ruim
Via do Conhecimento - PR 493 (PR)	0 - 100	4,7	Muito Ruim
	100 - 200	5,1	Muito Ruim
	200 - 300	6,6	Muito Ruim
	300 - 400	4,5	Ruim
	400 - 500	4,1	Ruim

Como apresentado na Tabela 2, o IRI 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. A dispersão do IRI se deve às diferentes condições de rolamento dos segmentos. Os valores de IRI foram confrontados aos dados de aceleração verticais fornecidos pelos smartphones a partir de análises estatísticas da relação IRI-RMSVA. Tais análises foram realizadas após um processamento dos sinais fornecidos pelos smartphones, necessário para reduzir a influência negativa de ruídos presentes nos sinais. Os ruídos podem ser considerados como informações, incorporadas aos sinais, não relacionadas ao fenômeno em estudo. Em coletas de campo, observou-se que, mesmo em baixas rotações, ruídos provocados pelo motor dos veículos afetavam as medidas fornecidas pelos smartphones. Essas vibrações resultaram em eventos com magnitudes significativas, próximas de 50 Hz e acima, causadas pelas explosões dos cilindros geradas a cada rotação do eixo dos motores, o que foi notado nos espectros em frequência das acelerações para rotações próximas de 1500 rpm (rotações por minuto), especialmente a 40 km/h.

A aplicação de filtros digitais pode atenuar o efeito indesejado de ruídos. Para isto, é preciso diferenciar o espectro em frequência entre o ruído e o evento observado. Para este estudo, interessam as vibrações do chassi provocadas pelas irregularidades do pavimento. As maiores amplitudes do espectro vibracional, típicas dessas acelerações, ocorrem em torno de 1 a 2 Hz e entre 10 e 20 Hz. Como explicam Sayers e Karamihas (1998), as vibrações em torno de 5 Hz causam dores torácicas ou abdominais em seres humanos e, por isso, suspensões veiculares são projetadas para amenizar e distribuir essas acelerações para frequências nas faixas de 1 a 2 Hz e de 10 a 15 Hz. Analogamente, Gillespie (1992) cita que a resposta em frequência de um quarto de carro se estende na faixa de 0,5 a 20 Hz. Para diferentes tipos de veículos, com quatro rodas, outras informações se manifestam (Sayers e Karamihas, 1998).

Neste trabalho, aplicaram-se filtros de Fourier do tipo passa-baixa de 0,2 Hz a 50 Hz, 0,2 Hz a 25 Hz e 0,2 Hz a 20 Hz nos sinais de aceleração. O filtro passa-alta de 0,2 Hz foi aplicado em todas as faixas para eliminar a influência da gravidade (componente DC – *Direct Current*). O filtro de 0,2 Hz a 100 Hz equivale a não utilização de filtro, já que os espectros de aceleração foram plotados com frequências de até 100 Hz, por este ser o limite superior possível de ser representado, uma vez que a taxa de aquisição foi de 200 Hz, fixada como a necessária para evitar o efeito do *aliasing*. O *aliasing* ou dobra espectral pode ser entendido a partir do teorema

de Nyquist, no qual se define que a frequência de amostragem de um sinal analógico deve ser, no mínimo, maior ou igual a duas vezes a largura de banda desse sinal. O filtro de 0,2 a 100 Hz permitiu a análise da influência da aplicação ou não dos filtros sobre os sinais coletados.

Os resultados relativos aos primeiros dois cenários propostos, após o processamento dos sinais, são apresentados na forma de tabelas, com as seguintes medidas estatísticas: média aritmética do RMSVA ($\overline{RMSVA}$); coeficiente de determinação (R^2) do modelo de regressão linear simples obtido na predição da variável IRI em função da variável RMSVA; razão entre o $\overline{RMSVA}$ e o intercepto da equação de regressão ($\overline{RMSVA}/\text{intercepto}$); e Coeficiente de Variação (CV) do RMSVA, para a análise da repetitividade do índice em relação às 5 coletas cumpridas em cada trecho. Na Tabela 3, apresenta-se um resumo dos resultados referentes à variação do modelo de smartphone e fixação das demais variáveis (veículo, velocidade e montagem).

Tabela 3: Resumo de medidas estatísticas resultantes da variação do modelo de smartphone.

Cenário	Filtro =	0,2 - 20 Hz	0,2 - 25 Hz	0,2 - 50 Hz	0,2 - 100 Hz
FF - G4** - TA - 60	$\overline{RMSVA}$ =	0,79	0,85	1,82	1,85
FF - G5** - TA - 60	$\overline{RMSVA}$ =	1,45	1,77	1,83	1,82
FF - Z2** - TA - 60	$\overline{RMSVA}$ =	0,77	0,81	0,92	1,11
FF - G4** - TA - 60	R^2 =	0,64	0,67	0,19	0,19
FF - G5** - TA - 60	R^2 =	0,66	0,64	0,66	0,67
FF - Z2** - TA - 60	R^2 =	0,67	0,68	0,69	0,69
FF - G4** - TA - 60	$\overline{RMSVA}/\text{Intercepto}$ =	0,77	1,09	0,76	0,81
FF - G5** - TA - 60	$\overline{RMSVA}/\text{Intercepto}$ =	0,75	4,39	46,92	-13,28
FF - Z2** - TA - 60	$\overline{RMSVA}/\text{Intercepto}$ =	0,77	1,01	2,38	5,53
FF - G4** - TA - 60	CV (%) =	31,37	29,65	29,33	27,97
FF - G5** - TA - 60	CV (%) =	30,46	24,68	24,20	23,99
FF - Z2** - TA - 60	CV (%) =	31,42	30,10	27,03	34,18

Nos resultados da Tabela 3, nota-se que o $\overline{RMSVA}$ apresentou uma variação considerável entre os modelos de smartphones avaliados. Percebe-se que essa variação depende do conteúdo em frequência dos sinais, o qual foi afetado pelos ruídos, já que o $\overline{RMSVA}$ variou com a alteração da faixa de corte dos filtros. Ao se analisar o $\overline{RMSVA}$ obtido com a aplicação do filtro de 0,2-100 Hz, observa-se que o smartphone Z2 apresentou um $\overline{RMSVA}$ 30% mais baixo que a média dos três modelos. No entanto, conforme o valor do filtro passa-baixa diminuiu, a diferença entre eles se modificou. No filtro de banda mais estreita, de 0,2 a 20 Hz, houve uma variação maior do $\overline{RMSVA}$ do modelo G5, de 44% acima da média, em relação aos modelos G4 e Z2.

Com o decréscimo do valor de corte do filtro passa-baixa, houve uma redução gradativa dos ruídos presentes nos sinais, pois o conteúdo em frequência do ruído apresentou magnitudes relevantes em frequências maiores que as do fenômeno observado, isto é, as vibrações do chassi, relacionadas às irregularidades do pavimento, giram em torno de 0,2 a 25 Hz, enquanto as vibrações produzidas pelo motor do veículo apresentam frequências maiores. Com isso, subentende-se que o modelo G5 apresentaria menos informações associadas aos ruídos, pelo fato de apresentar uma menor redução da ordem de grandeza do $\overline{RMSVA}$.

Com relação ao R^2 , observa-se que os valores foram similares, com um R^2 médio de 0,66 para os três modelos, considerando os filtros passa-faixa de 0,2-20 Hz e 02-25 Hz. No entanto, para os filtros com valor de corte em passa-baixa de 50 Hz e 100 Hz, o R^2 do modelo G4 foi mais baixo, de 0,19. Com isso, supõe-se que o modelo G4 apresentaria mais informações associadas

aos ruídos, o que é corroborado pelo fato do $\overline{RMSVA}$ ter apresentado uma redução maior com o estreitamento da banda do filtro quando comparado aos outros dois modelos: diminuição de 1,06 m/s², 0,37 m/s² e 0,34 m/s², para os modelos G4, G5 e Z2, respectivamente. Douangphachanh e Oneyama (2014) obtiveram um R² de 0,703 e 0,760 para a correlação dos dados dos smartphones Samsung Galaxy Note 3 e LG 4X HD, respectivamente, a partir de fixação em suportes antiderrapantes de painel, com filtro de 0 a 50 Hz. Aleadelat *et al.* (2018) observaram uma diferença significativa no R² obtido em modelo de predição do IRI com dados de aceleração vertical de um smartphone Samsung Galaxy S3 e um Sony Xperia. Para o primeiro modelo, o R² variou de 0,74 a 0,85, enquanto para o segundo, variou de 0,20 a 0,49.

Thiandee *et al.* (2019) utilizaram a segmentação de trechos a cada 5 metros. Com o RMS gerado pelas acelerações dos três eixos de smartphones e o IRI calculado com dados de um perfilômetro inercial a laser, geraram modelos de predição a partir da técnica de RNA (Redes Neurais Artificiais), com amostras de treinamento em 2km e aplicação do modelo em 9km. Obtiveram um R² de 0,1004, 0,2230 e 0,4134 para modelos de smartphones Samsung, Nokia e Honor, respectivamente. Neste caso, observa-se que a relação entre dados de smartphones e o IRI ocorreram a partir de uma segmentação menor de trechos rodoviários. A vantagem do processo consiste na utilização de um maior número de amostras para a obtenção do modelo de predição do IRI. Almeida *et al.* (2017) também trabalharam com a subdivisão de um trecho de 320 metros em segmentos de 10 metros. Obtiveram um R² de 0,6371 para o IRI calculado com dados de um levantamento com Nível e Mira em relação ao IRI estimado com dados de um smartphone. Apesar do maior número de amostras, ressalta-se que os comprimentos de onda maiores, que contribuem para o valor do IRI, são desconsiderados nesse processo.

No que diz respeito à relação $\overline{RMSVA}$ /Intercepto, não se observou uma tendência de aumento ou diminuição do índice, apenas uma semelhança de resultados para o filtro 0,2-20 Hz. A análise dessa relação é importante por esta estar associada a falhas intrínsecas ao sistema de medição. Quanto menor a média dos valores da variável independente, em relação ao intercepto, maior é a probabilidade de existência de erros sistemáticos em medidores do tipo resposta, o que significa que, nesta situação, o sistema pode ser considerado relativamente insensível às irregularidades do pavimento e, portanto, de validade duvidosa (ASTM E 1448/92).

De maneira geral, os resultados indicaram um erro sistemático considerável para todos os smartphones, uma vez que em boa parte dos casos o $\overline{RMSVA}$ foi menor do que o valor do intercepto. Além disso, nota-se que a aplicação dos filtros não foi efetiva para a atenuação do erro sistemático. Supõe-se que esse resultado tenha relação com o fato dos smartphones apresentarem um ruído de fundo aleatório, dado que o acelerômetro instalado nesses dispositivos pode registrar alguns valores baixos de aceleração, mesmo quando o celular está estático. Isso faz com que, apesar do veículo estar parado, ainda seja possível a obtenção de um valor de RMSVA relevante, o qual seria representado como um valor numérico que corta o eixo das ordenadas, e que seria configurado como um erro sistemático de medição.

Em relação à repetitividade do RMSVA, ao se considerar os três modelos de smartphones e os filtros aplicados, o CV médio foi de 28,70%. Nota-se que a aplicação dos filtros não causou impacto significativo na repetitividade do RMSVA. Na pesquisa de Buttler e Islam (2014), foram obtidos valores de CV de 9 a 11%, com valores maiores que 20% em apenas três das quarenta seções (de 160 metros) avaliadas, em análise de repetitividade do IRI obtido com dados de um smartphone, modelo Samsung Galaxy, e um veículo da marca Honda, modelo CR-

V, para 5 viagens de coleta. Em um trecho de 1 km, segmentado a cada 100 metros, para 8 viagens de coleta, Hanson *et al.* (2014) obtiveram CV de 2,91%, 2,19% e 5,84% para o IRI estimado com os smartphones Galaxy S3, Blackberry Z10 e iPhone 5, respectivamente. Ao citar a classificação funcional de pavimentos relacionada aos valores de IRI esperados para determinados tipos de vias, apresentada por Sayers e Karamihas (1998), Hanson *et al.* (2014) utilizaram o exemplo das autoestradas e aeroportos para citar que, nesses casos, como a faixa de IRI prevista é de até 2 m/km, uma variação de 10% no índice possivelmente não seria convertida em falhas de classificação em um SGP para o nível de rede. A norma ASTM E 1364, que trata dos limites de aceitabilidade dos resultados de testes de verificação de perfilômetros inerciais, indica o limite de 5% para o CV em testes de repetitividade. Assim, nota-se que a variabilidade do RMSVA obtida nos testes está um pouco acima das referências citadas.

Em Bisconsini (2016) também foi avaliada a correlação entre o RMSVA das acelerações verticais fornecidas por um smartphone e o IRI. Na ocasião, utilizou-se um smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, um veículo da marca Volkswagen, modelo Gol G2 e suporte do tipo antiderrapante. O IRI foi obtido também em uma extensão total de 1500 metros de pavimentos, com diferentes níveis de irregularidade, para uma média de 10 viagens, ao invés de 5, caso deste estudo. O CV obtido para as velocidades de 40 e 60 km/h foram de 4,5% e 5,1%, respectivamente. Para investigar essa situação, foram realizadas mais dez coletas para o estudo atual, nos cenários FF-S5-TA-40 e FF-G5-TA-60. O CV obtido foi de 8,6% e 4,1% para as velocidades de 40 e 60 km/h, respectivamente, resultado similar àquele obtido em Bisconsini (2016), ambos melhores do que os resultados obtidos para apenas 5 viagens, além de se enquadrar dentro dos limites aceitáveis para aplicações em nível rede, o que indica a importância da realização de um maior número de viagens para a melhoria dos modelos de calibração, como recomendado pela norma ASTM E 1364. Na Tabela 4 é apresentado um resumo dos resultados relativos às coletas realizadas com os três tipos de veículos avaliados.

Tabela 4: Resumo de medidas estatísticas resultantes da variação do tipo de veículo.

Cenário	Filtro =	0,2 - 20 Hz	0,2 - 25 Hz	0,2 - 50 Hz	0,2 - 100 Hz
RM** - G4 - TA - 60	$\overline{RMSVA}$ =	0,88	0,93	1,61	1,64
FE** - G4 - TA - 60	$\overline{RMSVA}$ =	0,91	0,96	1,33	1,34
FF** - G4 - TA - 60	$\overline{RMSVA}$ =	0,79	0,83	1,77	1,80
RM** - G4 - TA - 60	R^2 =	0,54	0,58	0,68	0,70
FE** - G4 - TA - 60	R^2 =	0,73	0,73	0,65	0,62
FF** - G4 - TA - 60	R^2 =	0,74	0,75	0,14	0,14
RM** - G4 - TA - 60	$\overline{RMSVA}/\text{Intercepto}$ =	0,93	1,48	0,61	0,65
FE** - G4 - TA - 60	$\overline{RMSVA}/\text{Intercepto}$ =	-2,82	-2,94	-0,41	-0,42
FF** - G4 - TA - 60	$\overline{RMSVA}/\text{Intercepto}$ =	1,09	1,68	0,67	0,71
RM** - G4 - TA - 60	CV (%) =	27,99	26,58	27,95	27,73
FE** - G4 - TA - 60	CV (%) =	23,69	23,60	13,76	13,43
FF** - G4 - TA - 60	CV (%) =	30,79	29,10	28,81	27,06

Em relação aos resultados da Tabela 4, observa-se que o $\overline{RMSVA}$ apresentou uma variação significativa entre os tipos de veículos, sendo essa diferença reduzida com a modificação da faixa de corte dos filtros. Ao se analisar o $\overline{RMSVA}$ obtido com a aplicação do filtro 0,2-100 Hz, nota-se que o veículo FE apresentou um $\overline{RMSVA}$ 16% mais baixo que a média dos três modelos. No entanto, com a redução do valor do filtro passa-baixa, a diferença diminuiu. Com o filtro 0,2-20 Hz, houve uma variação máxima de 8% em torno do $\overline{RMSVA}$ para o veículo FF.

Sobre o R^2 , observa-se, assim como ocorrido na análise de variação dos modelos de smartphones, uma variação maior quando da passagem do filtro 0,2-50 Hz para 0,2-25 Hz. Nessa mudança, nota-se que o R^2 dos modelos FF e FE aumentaram, enquanto a do veículo RM diminuiu. Presume-se que o veículo FF apresentou mais informações associadas aos ruídos, dado o aumento significativo do R^2 , de 0,14 para 0,75, o que novamente parece estar associado à maior redução do $\overline{RMSVA}$ para esse veículo quando comparado ao $\overline{RMSVA}$ obtido para os outros dois modelos: diminuição de 1,01 m/s², 0,76 m/s² e 0,43 m/s², para os modelos FF, RM e FE, respectivamente. Apesar disso, nota-se que a aplicação do filtro pode surtir efeito negativo, já que, para o veículo RM, a diminuição do valor de corte do filtro passa-baixa resultou em uma redução do R^2 , diferente do que ocorreu para os outros dois modelos.

No tocante à relação $\overline{RMSVA}$ /Intercepto, o valor ainda é próximo da unidade para as medidas dos três veículos, o que indica que os erros sistemáticos permaneceram relativamente constantes, independentemente do modelo do veículo, com valor médio, em módulo, de 1,6. Em relação à repetitividade do RMSVA, ao se considerar os três veículos analisados e os filtros aplicados, o CV médio foi de 25,04%. Novamente, os valores foram próximos aos obtidos na análise de variação dos modelos de smartphones e estão fora do que seria o intervalo aceitável para aplicações de gerência em nível de rede. Nota-se, novamente, que a filtragem não impactou significativamente na repetitividade do RMSVA. Para o IRI estimado com dados de um iPhone 5, a partir de três tipos de veículo, Hanson *et al.* (2014) obtiveram um CV de 2,99%, 2,05% e 5,98% para um modelo compacto (*Pontiac Sunfire*), um SUV (*Nissan Rogue*) e uma camionete (*Ford F250*), respectivamente, para a velocidade de 50 km/h, e de 5,84%, 3,45% e 8,06% para 80 km/h. Nota-se que o modelo de veículo parece não afetar significativamente o CV.

Para a análise da influência do tipo de montagem, foram realizadas medições de acelerações verticais com o veículo parado, com a marcha em ponto neutro, a fim de avaliar o efeito do ruído gerado pelo motor sobre os sinais coletados, em rotações de 1500 a 2500 rpm. Na Figura 3 são apresentadas, a título de exemplo, medições realizadas com três tipos de montagem, em rotações em torno de 2000 rpm, pelo fato das medições de campo terem sido próximas deste intervalo. Os resultados indicam a influência da rotação na propagação de ruídos.

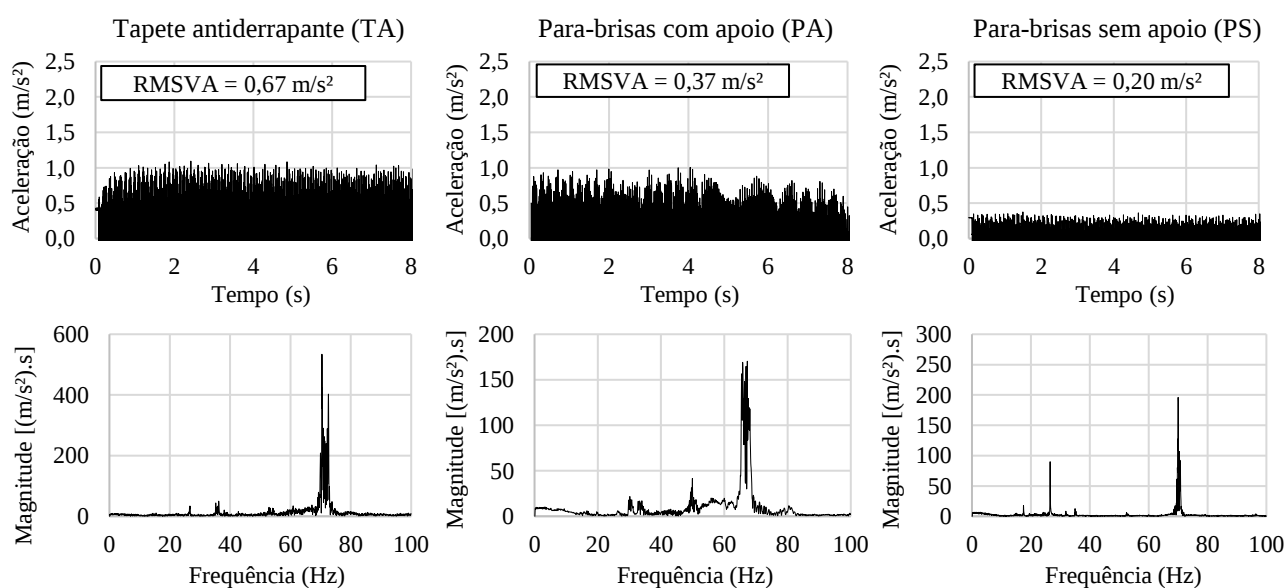


Figura 3: Vibrações típicas produzidas pelo motor na faixa de 2000 rpm.

Na análise da amplitude do ruído, em termos de RMSVA, é importante a percepção do efeito deste sobre os dados medidos em campo. A título de exemplo, levando-se em consideração as coletas realizadas com o veículo FF e suporte para-brisas com apoio no painel (PA), tem-se que o $\overline{RMSVA}$ foi de 0,61 m/s² para a velocidade de 60 km/h, no segmento AI, de menor irregularidade. Já o $\overline{RMSVA}$ máximo foi de 1,28 m/s², no segmento IP, de maior irregularidade. Com isso, torna-se evidente o efeito do ruído no sinal coletado em campo. No trecho AI, por exemplo, utilizou-se a quarta marcha, em 60 km/h, que resultou em rotações em torno de 1500 rpm. Nesse caso, o ruído gerado pelo motor foi de cerca de 0,30 m/s², para o suporte PA. Assim, o efeito relativo do ruído, sobre o sinal medido em campo, foi de cerca de 49%. Já no segmento PR, utilizou-se a terceira marcha, para a velocidade de 40 km/h, em um trecho em aclave, que gerou rotações em torno de 1800 rpm, e um $\overline{RMSVA}$ de 0,81 m/s², enquanto o ruído estimado, para o suporte utilizado, foi de 0,67 m/s², o que resultou em um efeito relativo de 83% sobre o sinal coletado. As análises em diferentes rotações indicaram que o suporte do tipo para-brisas, sem apoio no painel (PS), foi o que proporcionou um menor nível de ruídos. Acredita-se que o resultado se deva ao fato deste não incorporar as ressonâncias do painel.

Os testes com o suporte PA foram realizados pelo fato deste proporcionar uma praticidade maior de acionamento de início e fim da gravação de dados, o que permitiria o uso de outras funções, como o registro de imagens e áudios, que também podem ser georreferenciados. A utilização do apoio da parte inferior do suporte para-brisas no painel se deu pela suposição de que o mesmo reduziria o efeito de ressonância do braço do suporte para-brisas. Apesar dos resultados indicarem a não necessidade do apoio para o suporte para-brisas, ressalta-se que alguns modelos desse tipo de suporte não foram utilizados nos testes, justamente por apresentarem, de antemão, vibrações ressonantes excessivas.

Na Tabela 5 é apresentado um resumo dos resultados para as velocidades de 40 e 60 km/h.

Tabela 5: Resumo das medidas estatísticas resultantes da variação da velocidade.

Cenário	Filtro =	0,2 - 20 Hz	0,2 - 25 Hz	0,2 - 50 Hz	0,2 - 100 Hz
EF** - G4 - TA - 40	$\overline{RMSVA}$ =	0,62	0,68	1,53	1,54
EF** - G4 - TA - 60	$\overline{RMSVA}$ =	0,91	0,96	1,32	1,33
EF** - G4 - TA - 40	R ² =	0,66	0,68	0,18	0,16
EF** - G4 - TA - 60	R ² =	0,73	0,73	0,66	0,63
EF** - G4 - TA - 40	$\overline{RMSVA}$ /Intercepto =	1,36	5,17	1,60	1,62
EF** - G4 - TA - 60	$\overline{RMSVA}$ /Intercepto =	-2,82	-2,97	-0,42	-0,43
EF** - G4 - TA - 40	CV (%) =	27,11	25,37	19,90	19,35
EF** - G4 - TA - 60	CV (%) =	23,69	23,62	14,06	13,70

Na Tabela 5, observa-se que o $\overline{RMSVA}$ obtido a 60 km/h foi, em média, 0,24 m/s² maior que o calculado para os dados coletados a 40 km/h. O resultado pode estar relacionado ao aumento das vibrações da carroceria do veículo para uma velocidade maior. Com a redução do valor do filtro passa-baixa de 100 Hz para 20 Hz, o $\overline{RMSVA}$ apresentou um decréscimo de cerca de 59% para a velocidade de 40 km/h contra uma redução de aproximadamente 32% para a velocidade de 60 km/h. A maior diminuição relativa do $\overline{RMSVA}$ para os dados coletados a 40 km/h está, mais uma vez, associada a um efeito maior dos ruídos, principalmente do motor, sobre as acelerações decorrentes das irregularidades do pavimento.

Os valores de R^2 obtidos a 60 km/h foram maiores que os obtidos a 40 km/h, o que se manteve mesmo com a variação dos filtros. Também é possível notar que, de maneira geral, a aplicação dos filtros resultou em um aumento do R^2 , sendo esse aumento maior para a velocidade de 40 km/h, com um crescimento de $R^2 = 0,18$ (0,2-50 Hz) para $R^2 = 0,68$ (0,2-25 Hz). Esse aumento também ocorreu para a velocidade de 60 km/h, mas de forma mais branda, de $R^2 = 0,66$ (0,2-50 Hz) para $R^2 = 0,73$ (0,2-25 Hz). Novamente, esse resultado vai ao encontro da suposição de que o ruído tem maior impacto sobre os sinais coletados a uma velocidade menor.

Não foi possível notar, assim como em outros cenários, um efeito claro da variação dos filtros ou velocidades sobre o índice RMSVA/Intercepto. No tocante à repetitividade do RMSVA, nota-se que o CV aumentou após a aplicação dos filtros. Essa tendência não foi observada nos outros cenários, apesar do aumento do R^2 . Os resultados foram similares para as velocidades de 40 e 60 km/h, com um CV médio de 20,85%.

Apesar de não constar na Tabela 1, devido a variação de suporte e veículo, esses resultados foram similares aos obtidos para a variação de velocidade no cenário FF-S5-PA-40/60. Neste caso, obteve-se maior correlação entre o RMSVA e o IRI para a velocidade de 60 km/h, com r de Pearson de 0,86 ($R^2 = 0,74$), contra um r de Pearson de 0,38 ($R^2 = 0,14$), para a velocidade de coleta de 40 km/h. Com a aplicação de filtro 0,2-25 Hz, houve um leve aumento da correlação RMSVA-IRI para a velocidade de 60 km/h, com r de Pearson de 0,90 ($R^2 = 0,81$), contra um aumento significativo de r de Pearson de 0,93 ($R^2 = 0,86$), para a velocidade de 40 km/h. Assim, nota-se, novamente, que a melhoria do modelo de predição do IRI pelo RMSVA, representada pelo aumento do R^2 , com a aplicação dos filtros, foi mais expressiva para os dados coletados a 40 km/h, o que corrobora com a suposição de que para velocidades menores, em que há uma menor excitação do chassi do veículo, a ordem de grandeza das acelerações verticais produzidas pelas irregularidades do pavimento passa a ser semelhante à amplitude das acelerações produzidas por outros fatores, especialmente pelas rotações do motor.

4. CONCLUSÃO

Neste estudo, investigou-se a influência de alguns fatores que podem afetar a utilização de dados de smartphones para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos. A análise foi baseada em um comparativo entre o IRI, obtido a partir do método de Nível e Mira, e o RMSVA (*Root Mean Square of Vertical Acceleration*), calculado com os sinais de aceleração verticais medidos por smartphones embarcados em veículos. Dentre os fatores analisados, cita-se o modelo de smartphone, do veículo, a velocidade e o tipo de montagem, assim como a influência de ruídos externos ao sistema. A motivação do estudo está relacionada ao fato de muitos órgãos rodoviários, especialmente em países em desenvolvimento, trabalharem com maiores restrições orçamentárias. Nesse contexto, prejudica-se a continuidade dos programas de monitoramento de defeitos em rodovias, essencial para a alimentação de bancos de dados que servem de base para as tomadas de decisões em um SGP, muitas delas firmadas em parâmetros de desempenho dos pavimentos, como é o caso da irregularidade.

A seguir, são listadas as principais considerações a respeito dos resultados obtidos neste estudo:

- Velocidade de coleta: em razão das condições geométricas e operacionais dos segmentos rodoviários selecionados para esta pesquisa, as coletas foram realizadas apenas com velocidades de 40 km/h e 60 km/h. Os resultados apontaram que a coleta de dados a uma velocidade menor pode reduzir a qualidade do modelo de regressão para a predição do IRI

pelo RMSVA quando não há um tratamento prévio dos dados para a redução de efeitos indesejados de ruídos. Em levantamentos realizados a velocidades menores, presume-se que a excitação do chassi do veículo é menor. Com isso, a amplitude das acelerações verticais provocadas pela irregularidade longitudinal passa a ser mais próxima da amplitude das acelerações geradas por elementos externos ao sistema, principalmente pelas rotações do motor, como apontado nos resultados dos testes de vibração com o veículo parado.

- Filtros digitais: a aplicação de filtros digitais, neste caso, filtros de Fourier, foi importante para o aumento da correlação entre RMSVA e IRI, especialmente para os dados coletados a uma velocidade menor, de 40 km/h, na qual o efeito de ruídos do motor era maior. Neste caso, o R^2 aumentou de 0,15 (filtro passa-baixa de 100 Hz) para 0,86 (filtro passa-banda de 0,2 a 25 Hz) e de 0,73 (filtro passa-baixa de 100 Hz) para 0,81 (filtro passa-banda de 0,2 a 25 Hz) para os dados coletados a 60 km/h, para o veículo FF, smartphone S5 e montagem PA. Supõe-se que o filtro passa-banda ideal esteja próximo de 0,2 a 25 Hz, pois, nessa faixa, reduz-se o efeito de frequências próximas ao DC e superiores a 25 Hz, as quais não decorrem das vibrações de chassi e pneus produzidas pelas irregularidades do pavimento.
- Taxa de aquisição: os resultados indicam a necessidade da consideração do efeito do *aliasing* e, conseqüentemente, da fixação de uma taxa de aquisição de dados adequada, devido à influência de ruídos de magnitudes relevantes em frequências acima de 50 Hz, mesmo em baixas rotações, como de 1500 rpm. A utilização de taxas de 100 Hz ou menos, como ocorrido em trabalhos correlatos (Douangphachanh e Oneyama, 2014; Hanson *et al.*, 2014; Jones e Forslof, 2015), limita a reprodução de eventos a frequências de 50 Hz ou menos. Nessa situação, a probabilidade de ocorrência de falhas é maior, tanto pela redução do nível das vibrações do chassi, quanto por erros de reprodução dos sinais no domínio da frequência, o que afeta qualquer análise de correlação de dados de smartphones ou estimativa do IRI, já que esta depende do tratamento dos sinais no domínio da frequência. Para reduzir a probabilidade de ocorrência de *aliasing*, recomenda-se a utilização de taxas de 200 Hz ou acima, e o uso do suporte do tipo para-brisas, desde que este seja pouco flexível, já que este apresentou baixos níveis de ruídos nos testes de rotação.
- Número de coletas: a repetitividade do RMSVA foi analisada com base na medida estatística Coeficiente de Variação (CV). O sistema apresentou um CV médio na faixa de 25 a 30% para o RMSVA obtido a partir de 5 viagens. No entanto, a partir de 10 viagens de coleta, o CV reduziu-se para um valor médio entre 5 e 10%, considerando os resultados da pesquisa atual e anterior (Bisconsini, 2016). Ao se levar em conta a norma ASTM E 1364, que aponta o limite superior de 5% para o CV em testes de verificação de perfilômetros inerciais, acredita-se que os dados fornecidos por smartphones apresentam repetitividade aceitável para aplicações de um SGP em nível de rede, principalmente em termos de categorias de classificação de IRI (Aleadelat *et al.*, 2018), ao se tomar como referência o método utilizado nesta pesquisa e em estudos similares (Buttlar e Islam, 2014; Hanson *et al.*, 2014), especialmente se os resultados forem utilizados para a classificação qualitativa do pavimento e não para a obtenção de medidas exatas de IRI. Entretanto, destaca-se a importância do atendimento às diretrizes de normas de calibração do sistema, como qualquer outro medidor do tipo resposta.

Por fim, considera-se que a avaliação da irregularidade longitudinal, com dados de smartphones, é viável para a alimentação de bancos de dados de um SGP. Como o método é

baseado nos sistemas de medição do tipo resposta, sugere-se a calibração seja realizada por órgãos rodoviários, simultaneamente ou em datas próximas de avaliações funcionais correntes em rodovias brasileiras, mas realizadas esporadicamente, seja por questões técnicas e/ou orçamentárias, como do levantamento da irregularidade ou avaliações subjetivas. O sistema pode ser utilizado em fiscalizações de rotina, sem prejuízo ao serviço do engenheiro, o que possibilita o acompanhamento contínuo de rodovias e a determinação de segmentos com condições de manutenção (nível de rede) prioritárias ou a solicitação de uma avaliação complementar detalhada em trechos específicos (nível de projeto). Sugere-se que, em futuros trabalhos, seja estendida a análise do tipo e peso do veículo e variação da velocidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS – ASTM (1995). *Measuring Road Roughness by Static Level Method*. ASTM E 1364. United States of America – USA.
- Almeida, L. C. de; Oliveira, F. H. L. de e Ramos, S. P. (2017) *Estudo da condição de superfície em rodovias por meio do uso de aplicativo para smartphone*. Transportes. Rio de Janeiro, RJ. v. 25, n. 2, p. 70-83.
- Almeida, L. C. (2018) *Aplicativo para Smartphone Destinado à Medição da Irregularidade Longitudinal em Rodovias*. Dissertação, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- Aleadelat, W.; Ksaibati, K.; Cameron, H. G. W. e Saha P. (2018) *Evaluation of Pavement Roughness Using an Android-Based Smartphone*. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements. v. 144, p. 1-9.
- Bisconsini, D. R. (2016) *Avaliação da Irregularidade Longitudinal dos Pavimentos com Dados Coletados por Smartphones*. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos da USP. São Carlos, SP.
- Buttlar, W. G. e S. Islam (2014) *Measurement of pavement roughness using an Android-based smartphone application*. Transportation Research Board 93rd, Washington D.C., USA. L
- DNER-ES 173/86 (1986). *Método do Nível e Mira para Calibração de Sistemas Medidores de Irregularidade Tipo Resposta*. Ministério Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- Douangphachanh, V. e H. Oneyama (2014) *Estimation of road roughness condition from smartphones under realistic settings*. In 13th International Conference on ITS Telecommunications (ITST). p. 433-439.
- Gillespie, T. D. (1992) *Fundamental of Vehicles Dynamics*. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers. 470p.
- Hanson, T.; C. Cameron e E. Hildebrand (2014) *Evaluation of low-cost consumer-level mobile phone technology for measuring international roughness index (IRI) values*. Canadian Journal of Civil Engineering. p. 819-827.
- Jones, H. e L. H. Forslof (2015) *Roadroid: Continuous Road Condition Monitoring with Smart Phones*. Journal of Civil and Architecture (9). p. 485-496.
- Laubis, K.; Simko, V.; Schuller A. e C. Weinhardt (2017) *Road Condition Estimation Based on Heterogeneous Extended Floating Car Data*. In Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS2017), p. 1582-1591. 2017.
- Sayers, M. W.; T. D. Gillespie e W. D. O. Paterson (1986) *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements*. World Bank Technical Paper Number 46, 87 p.
- Sayers, M. W. e S. M. Karamihas (1998) *The little book of profiling*. Ann Arbor: Transportation Research Institute, University of Michigan, USA.
- Thiandee, P.; Witchayangkoon B.; Sirimontree S. e P. Lertworawanich (2019) *An Experiment on Measurement of Pavement Roughness Via Android-Based Smartphones*. International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies. v. 10. n. 9, p. 1-9.

Danilo Rinaldi Bisconsini (danilorbisconsini@usp.br)¹

Jakeline Loureiro (jakelineloureiro@alunos.utfpr.edu.br)²

José Leomar Fernandes Júnior (leomar@sc.usp.br)³

^{1,3}Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
Av. Dr. Carlos Botelho, 1465 – São Carlos, SP, Brasil.

²Departamento de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco.
Via do Conhecimento, s/n - Km 1 - Pato Branco, PR, Brasil.