UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

**Avaliação da Irregularidade Longitudinal dos
Pavimentos com Dados Coletados por Smartphones**

Danilo Rinaldi Bisconsini

São Carlos

2016

Avaliação da Irregularidade Longitudinal dos Pavimentos com Dados Coletados por Smartphones

Danilo Rinaldi Bisconsini

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes.

Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientador: Prof. Titular José Leomar Fernandes Júnior

São Carlos

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B621a Bisconsini, Danilo Rinaldi
Avaliação da Irregularidade Longitudinal dos
Pavimentos com Dados Coletados por Smartphones / Danilo
Rinaldi Bisconsini; orientador José Leomar Fernandes
Júnior. São Carlos, 2016.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em
Infraestrutura de Transportes -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Irregularidade longitudinal de pavimentos. 2.
Smartphones. 3. IRI. 4. RMSVA. 5. SGP. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **DANILO RINALDI BISCONSINI**.

Título da dissertação: "Avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos com dados coletados por smartphones".

Data da defesa: 24/06/2016.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **José Leomar Fernandes Júnior**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Associado **Rodrigo Nicoletti**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Titular **Marcos Antonio Garcia Ferreira**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes:
Profª. Doutora **Ana Paula Camargo Larocca**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Aos meus pais Vilma e José, e minha irmã
Camila, por todo amor e apoio em todas as
etapas da minha vida

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, prof. Dr. José Leomar Fernandes Júnior, com quem tive a honra e orgulho de trabalhar durante esse período. Agradeço não só pela confiança, paciência e dedicação para me auxiliar na pesquisa, mas por todos os conselhos e convivência sincera, que muito me ensinaram não só no âmbito profissional, mas principalmente pessoal.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Transportes (STT) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP), pelos conhecimentos transmitidos, em especial ao prof. Dr. André Luiz Barbosa Nunes da Cunha e ao prof. Dr. Glauco Túlio Pessa Fabbri, pelas valiosas sugestões dadas em minha qualificação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

A toda minha família e amigos, principalmente à Vilma Rinaldi Bisconsini, José Bisconsini, Camila Rinadi Bisconsini e Halline Patrícia dos Santos Moraes, com quem posso contar em qualquer situação.

Ao prof. Dr. Rodrigo Nicoletti do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, que doou seu tempo para ajudar no planejamento e execução dos testes de vibração com os smartphones e na análise dos resultados.

Ao engenheiro Jorge Nicolau dos Santos, especialista em instrumentação do Laboratório de Engenharia Térmica e Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, pela paciência e disposição na montagem do sistema de coleta de dados com o acelerômetro piezoresistivo, desenvolvimento do software de análise de sinais e interpretação dos resultados.

Ao topógrafo Paulo Sérgio Batista e aos meus amigos de pós-graduação que me ajudaram na coleta de dados: Alisson Alberto de Lima Medeiros, Anthony Gomes, Flávio Maffioletti, Gabriel Oliveira, Jorge Braulio Cossío Durán, Leonardo Dal Picolo Cadurin, Loana Henriquez Sanchez, Rosuel Krum Mathias de Assis e Renaude Carneiro.

Ao Dr. Antonio Carlos Dinato e funcionários do Aeroporto Estadual de Araraquara, por toda assessoria prestada durante a coleta de dados no local.

Aos amigos de pós-graduação, também orientados do prof. Leomar, a quem chamo de irmãos acadêmicos, pelas inúmeras discussões que tanto contribuíram para a realização deste trabalho e, principalmente, pela amizade e todos maravilhosos momentos compartilhados.

Aos amigos que me ajudaram no processamento dos dados coletados, Fabrício Mourinho, Júnior Nunes e Petiano Camilo Bin.

Ao meu amigo Javier Machecha, que iniciou sua tese de doutorado sobre a avaliação de defeitos em ciclovias com uso de smartphones e foi muito importante na etapa final desta pesquisa.

“[...] acho que só há um caminho para a ciência — ou para a filosofia: encontrar um problema, ver a sua beleza e apaixonarmo-nos por ele; casarmos com ele, até que a morte nos separe — a não ser que obtenhamos uma solução. Mas ainda que encontremos uma solução, poderemos descobrir, para nossa satisfação, a existência de toda uma família de encantadores, se bem que talvez difíceis, problemas-filhos, para cujo bem-estar poderemos trabalhar, com uma finalidade em vista, até ao fim dos nossos dias.”

(Karl Popper)

RESUMO

BISCONSINI, D. R. **Avaliação da Irregularidade Longitudinal dos Pavimentos com Dados Coletados por Smartphones**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

A irregularidade longitudinal dos pavimentos prejudica a qualidade de rolamento, aumenta os Custos Operacionais dos Veículos (COV) e reduz a vida útil do pavimento. Vários instrumentos têm sido desenvolvidos com o propósito de medir a irregularidade longitudinal dos pavimentos, no entanto, existem conflitos que envolvem as diferentes classes de equipamentos, com relação à acurácia, custos e produtividade, o que dificulta a coleta contínua de dados, importante para a alimentação de um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP). Recentemente, algumas pesquisas começaram a relacionar a irregularidade longitudinal dos pavimentos aos sinais fornecidos pelos sensores de movimento (acelerômetros) e GPS (*Global Positioning System*) pré-instalados em smartphones, devido ao seu baixo custo, fácil operação e alta produtividade. Entretanto, ainda existem dúvidas sobre a qualidade e a forma de aplicação desses dados. Neste estudo, foram realizados testes de vibração e levantamentos de campo com smartphones, em três trechos de pavimentos com diferentes níveis de irregularidade (baixo, médio e alto), nos quais foram medidos sinais de aceleração vertical por meio de um smartphone fixado ao painel de um veículo, trafegando em diferentes velocidades. Com esses dados, calcularam-se valores de RMSVA (*Root Mean Square Vertical Acceleration*), que foram confrontados com a irregularidade longitudinal dos pavimentos, medida em IRI (*International Roughness Index*), por meio do método de Nível e Mira. Os testes mostraram ser a taxa de aquisição de dados dos smartphones o principal fator a afetar sua aplicação para a avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos. Ao considerar todas as faixas de irregularidade medidas, os valores de RMSVA apresentaram correlação positiva com o IRI, com coeficientes de correlação (R) entre 0,97 e 0,99 e repetitividade aceitável para levantamentos em nível de rede, com coeficientes de variação médios de 3 a 6%. Assim como indicado em pesquisas correlatas, conclui-se que os smartphones são uma alternativa viável para a avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos, especialmente em países com restrições de investimentos no setor rodoviário, desde que sejam tomados os devidos cuidados na coleta e aplicação dos dados medidos por esses dispositivos.

Palavras-chave: irregularidade longitudinal de pavimentos; smartphones; IRI; RMSVA; SGP.

ABSTRACT

BISCONSINI, D. R. **Evaluation of Longitudinal Pavement Roughness with Data Collected by Smartphones**. 2016. Dissertation (Master) – Sao Carlos School of Engineering, University of Sao Paulo, 2016.

The longitudinal pavement roughness affects the rolling quality, increases Vehicle Operating Costs (VOC) and reduces the pavement life. Several instruments have been developed for measuring longitudinal pavement roughness. However, there are conflicts involving different classes of equipment with respect to accuracy, costs and productivity, which complicate the continuous data collection, important for the Pavement Management Systems (PMS). Recently, some studies started to link longitudinal pavements roughness to the signals provided by motion sensors (accelerometers) and GPS (Global Positioning System) pre-installed on smartphones, due to its low cost, simple operation and high productivity. However, there are still doubts about the quality and the form of application of such data. In this study, vibration and field tests were performed with smartphones, in three pavement sections with different levels of roughness (low, medium and high), in which vertical acceleration signals were measured by a smartphone attached to a vehicle dashboard, traveling at different speeds. With these data, RMSVA values (Root Mean Square Vertical Acceleration) were calculated, which were compared with longitudinal pavement roughness, measured in IRI (International Roughness Index) through the Level and Rod method. The tests showed to be the data acquisition rate of smartphones the main factor affecting its application for the evaluation of longitudinal roughness of pavements. When considering all roughness ranges measured, RMSVA statistics showed a positive correlation with IRI, with correlation coefficients (R) between 0.97 and 0.99 and acceptable repeatability for network-level surveys, with average coefficient of variation of 3 to 6%. As indicated in related research, it was concluded that smartphones are a viable alternative for the evaluation of longitudinal pavements roughness, especially in countries with investment restrictions in the highway segment, if the data are collected and explained properly.

Keywords: longitudinal roughness of pavements; smartphones; IRI; RMSVA; PMS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema para ilustrar a Irregularidade longitudinal dos pavimentos (http://www.usp.br/ldsv/?page_id=217).....	6
Figura 2 – Viagraph: um dos primeiros equipamentos construídos para medir a irregularidade longitudinal dos pavimentos (HVEEM, 1960)	10
Figura 3 - Imagem esquemática de um perfilógrafo (HAAS <i>et al.</i> , 1994).....	11
Figura 4 – Unidade de gravação do Via-Log (HVEEM, 1960).....	11
Figura 5 - BPR <i>Roughometer</i> (Adaptada de GILLESPIE, 1992).....	12
Figura 6 – Desenho esquemático do perfilômetro CHLOE (HAAS <i>et al.</i> , 1994).....	13
Figura 7 – Figura esquemática de um Sistema Medidor de Irregularidade Rodoviária do Tipo Resposta (Adaptada de GILLESPIE, 1992)	13
Figura 8 – Influência do perfil da estrada e do veículo para a densidade espectral da velocidade no eixo do corpo do veículo (Adaptada de GILLESPIE <i>et al.</i> , 1980).....	15
Figura 9 - Representação do modelo quarto de carro e gráfico de resposta da suspensão em diferentes frequências (Adaptada de SAYERS e KARAMIHAS, 1998).....	16
Figura 10 - Esquema do funcionamento de um perfilômetro inercial (Adaptada de SAYERS e KARAMIHAS, 1998).....	17
Figura 11 – Esquema do APL francês (Adaptada de <i>Service technique de l'aviation civile</i>)..	18
Figura 12 – Medidor PPS-2000 (<i>Phoenix Scientific Inc</i> , 2004)	19
Figura 13 – Desenho esquemático do método de Nível e Mira (Adaptada de SAYERS e KARAMIHAS, 1998).....	20
Figura 14 - <i>Dipstick</i> (esquerda) e <i>Walking Profiler</i> (direita) (Adaptada de <i>Central Road Research Institute</i>).....	21
Figura 15 – MERLIN (MORROW <i>et al.</i> , 2006)	21
Figura 16 – Exemplo da aplicação de um smartphone para avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos em um SIG (Adaptada de FORSLOF, 2013)	27
Figura 17 – Imagem conceitual de um sistema de monitoramento contínuo da estrada (Adaptada de DOUANGPHACHANH E ONEYAMA, 2013).....	28
Figura 18 – Estrutura de um acelerômetro instalado em smartphones (Adaptada de DEY, 2014)	31
Figura 19 - Sistema de coordenadas de um smartphone	32
Figura 20 - Detalhe do registro das acelerações pelo aplicativo <i>AndroSensor</i>	32
Figura 21 – Diagrama do processamento dos sinais de aceleração para obtenção dos deslocamentos (Adaptada de Slifka, 2004)	37
Figura 22 - Vista aérea da Estrada Municipal Guilherme Scatena [Google Earth (2015)]	42
Figura 23 – Levantamento topográfico da Estrada Municipal Guilherme Scatena.....	43
Figura 24 - Vista aérea do Aeroporto Estadual de Araraquara [Google Earth (2015)].....	43
Figura 25 - Levantamento topográfico com Nível e Mira na pista do Aeroporto Estadual de Araraquara	43
Figura 26 - Vista aérea da Embrapa Pecuária Sudeste [Google Earth (2016)]	44
Figura 27 – Levantamento topográfico do segmento da Embrapa Pecuária Sudeste.....	44

Figura 28 - Testes com suporte veicular para smartphone fixado em para-brisa	48
Figura 29 - Testes com suporte veicular para smartphone fixado em painel.....	48
Figura 30 - Conjunto de equipamentos utilizados nos testes de vibração	51
Figura 31 - Detalhe da fixação do acelerômetro e smartphone sobre o <i>Shaker</i>	51
Figura 32 – Sistema de aquisição dos espectros coletados em campo.....	53
Figura 33 - Perfil da pista do Aeroporto Bartolomeu de Gusmão	57
Figura 34 - Perfil da Estrada Municipal Guilherme Scatena	58
Figura 35 – Perfil do trecho da Embrapa Pecuária Sudeste	58
Figura 36 - Índice Internacional de Irregularidade (IRI) dos trechos experimentais	59
Figura 37 – Estrada Municipal Guilherme Scatena	60
Figura 38 - Pista do Aeroporto Estadual de Araraquara	60
Figura 39 – Via da Embrapa Pecuária Sudeste	61
Figura 40 - Sinal de aceleração do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini: taxa de aquisição de 50 Hz e diferentes frequências de oscilação	62
Figura 41 - Sinal de aceleração do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini: taxa de aquisição de 100 Hz e diferentes frequências de oscilação	62
Figura 42 - Sinal de aceleração do smartphone Motorola Moto X Play: taxa de aquisição de 50 Hz e diferentes frequências de oscilação	63
Figura 43 - Sinal de aceleração do smartphone Motorola Moto X Play: taxa de aquisição de 100 Hz e diferentes frequências de oscilação	63
Figura 44 – Sinal de aceleração do smartphone Sony Xperia SP: taxa de aquisição de 50 Hz e diferentes frequências de oscilação.....	63
Figura 45 - Sinal de aceleração do smartphone Sony Xperia SP: taxa de aquisição de 100 Hz e diferentes frequências de oscilação.....	64
Figura 46 – Demonstração do efeito do <i>aliasing</i> no domínio do tempo [Adaptada de http://fourier.eng.hmc.edu/e59/lectures/e59/node26.html]	65
Figura 47 - Demonstração do efeito do <i>aliasing</i> no domínio da frequência [Adaptada de http://fourier.eng.hmc.edu/e59/lectures/e59/node26.html]	66
Figura 48 – Deslocamento do acelerômetro piezoelétrico calculado pela equação 1 e pelo algoritmo de Slifka (2004)	68
Figura 49 - Deslocamento do acelerômetro piezoelétrico calculado pela Equação 1 e do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini calculado pelo algoritmo de Slifka (2004)	69
Figura 50 – Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 20 km/h	71
Figura 51 – Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 40 km/h	72
Figura 52 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 60 km/h	72
Figura 53 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 20 km/h	73

Figura 54 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 40 km/h	74
Figura 55 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 60 km/h	74
Figura 56 – Perfil do espectro de aceleração da estrada filtrado pelo veículo (Adaptada de SAYERS e KARAMIHAS, 1998).....	75
Figura 57 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 20 km/h	76
Figura 58 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 40 km/h	76
Figura 59 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 60 km/h	77
Figura 60 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 20 km/h	77
Figura 61 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 40 km/h	78
Figura 62 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 60 km/h	78
Figura 63 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 20 km/h	79
Figura 64 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 40 km/h	80
Figura 65 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 60 km/h	80
Figura 66 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 80 km/h	81
Figura 67 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 100 km/h	81
Figura 68 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 20 km/h	82

Figura 69 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 40 km/h	82
Figura 70 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 60 km/h	83
Figura 71 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 80 km/h	83
Figura 72 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 100 km/h	84
Figura 73 –Comparação entre os espectros produzidos pelo Acelerômetro Piezoelétrico e pelo acelerômetro piezoresistivo, para amplitude do sinal de aproximadamente 2 m/s ²	86
Figura 74 - Aceleração do acelerômetro piezoelétrico e do acelerômetro piezoresistivo nos testes de vibração, para uma amplitude de aproximadamente 2 m/s ²	87
Figura 75 - Aceleração do acelerômetro piezoelétrico e do acelerômetro piezoresistivo nos testes de vibração, para uma amplitude de aproximadamente 6 m/s ²	88
Figura 76 - Aceleração do acelerômetro piezoelétrico e do acelerômetro piezoresistivo nos testes de vibração, para uma amplitude de aproximadamente 10 m/s ²	88
Figura 77 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, na Estrada Municipal Guilherme Scatena, a 20 km/h	89
Figura 78 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, na Estrada Municipal Guilherme Scatena, a 40 km/h	89
Figura 79 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, na Estrada Municipal Guilherme Scatena, a 60 km/h	90
Figura 80 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, na Embrapa Pecuária Sudeste, a 20 km/h	91
Figura 81 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, na Embrapa Pecuária Sudeste, a 40 km/h	91
Figura 82 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, na Embrapa Pecuária Sudeste, a 60 km/h	92
Figura 83 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, no Aeroporto Estadual de Araraquara, a 20 km/h	93
Figura 84 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, no Aeroporto Estadual de Araraquara, a 40 km/h	93
Figura 85 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, no Aeroporto Estadual de Araraquara, a 60 km/h	94
Figura 86 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, no Aeroporto Estadual de Araraquara, a 80 km/h	94
Figura 87 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, no Aeroporto Estadual de Araraquara, a 100 km/h	95
Figura 88 – Exemplo dos erros gerados no cálculo do coeficiente de correlação	97

Figura 89 - Sinais de aceleração coletados com o veículo parado, sem acelerar e com a marcha em ponto neutro	101
Figura 90 – Espectro dos sinais de aceleração coletados com o veículo parado, sem acelerar e com marcha em ponto neutro	102
Figura 91 – Sinais de aceleração coletados com o veículo parado, com baixas rotações e marcha em ponto neutro	103
Figura 92 - Sinais de aceleração coletados com o veículo parado, com baixas rotações e marcha em ponto neutro	103
Figura 93 – Análise tempo-frequência do sinal de aceleração coletado com o veículo parado, com baixas rotações e marcha em ponto neutro	104
Figura 94 - Sinais de aceleração coletados com o veículo parado, com rotações moderadas e marcha em ponto neutro	104
Figura 95 – Espectro dos sinais de aceleração coletados com o veículo parado, com rotações moderadas e marcha em ponto neutro	105
Figura 96 - Análise tempo-frequência do sinal de aceleração coletado com o veículo parado, com rotações moderadas e marcha em ponto neutro	105
Figura 97 - Sinais de aceleração coletados com o veículo parado, com altas rotações e marcha em ponto neutro	106
Figura 98 - Espectro dos sinais de aceleração coletados com o veículo parado, com altas rotações e marcha em ponto neutro	106
Figura 99 - Análise tempo-frequência do sinal de aceleração coletado com o veículo parado, com altas rotações e marcha em ponto neutro	107
Figura 100 – Sinal de aceleração do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, aplicativo <i>Accelerometer Analyser</i> , com taxa de aquisição de 50 Hz	109
Figura 101 - Sinal de aceleração do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, aplicativo <i>Accelerometer Analyser</i> , com taxa de aquisição de 200 Hz	109
Figura 102 - Sinal de aceleração do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Motorola Moto X Play, aplicativo <i>Accelerometer Analyser</i> , com taxa de aquisição de 50 Hz	110
Figura 103 – Sinal de aceleração do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Motorola Moto X Play, aplicativo <i>Accelerometer Analyser</i> , com taxa de aquisição de 100 Hz	110
Figura 104 - Sinal de aceleração do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Sony Xperia SP, aplicativo <i>Accelerometer Analyser</i> , com taxa de aquisição de 50 Hz.....	111
Figura 105 - Sinal de aceleração do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Sony Xperia SP, aplicativo <i>Accelerometer Analyser</i> , com taxa de aquisição de 100 Hz.....	111
Figura 106 – Sinais obtidos pelo smartphone Sony Xperia SP, taxa de aquisição de 100 Hz, aplicativo <i>Accelerometer Analyser</i> , com e sem coleta dos dados de GPS do aparelho	112
Figura 107 – Espectro de frequência dos sinais do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, com amplitude de aproximadamente 2 m/s ²	113
Figura 108 - Espectro de frequência dos sinais do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Motorola Moto X Play, com amplitude de aproximadamente 2 m/s ²	114
Figura 109 - Espectro de frequência dos sinais do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Sony Xperia SP, com amplitude de aproximadamente 2 m/s ²	114
Figura 110 – Deslocamento calculado a partir dos sinais do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, com taxa de aquisição de 200 Hz	115

Figura 111 – Sinais de aceleração: Estrada Municipal Guilherme Scatena.....	119
Figura 112 – Sinais de aceleração: Embrapa Pecuária Sudeste	120
Figura 113 – Sinais de aceleração: Aeroporto Estadual de Araraquara.....	120
Figura 114 – Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para a Estrada Municipal Guilherme Scatena, com velocidade operacional de 20 km/h.....	124
Figura 115 - Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para a Estrada Municipal Guilherme Scatena, com velocidade operacional de 40 km/h.....	124
Figura 116 – Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para a Estrada Municipal Guilherme Scatena, com velocidade operacional de 60 km/h.....	125
Figura 117 - Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para o segmento do Aeroporto Estadual de Araraquara, com velocidade operacional de 20 km/h.....	127
Figura 118 - Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para o segmento do Aeroporto Estadual de Araraquara, com velocidade operacional de 40 km/h.....	127
Figura 119 – Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para o segmento do Aeroporto Estadual de Araraquara, com velocidade operacional de 60 km/h.....	128
Figura 120 – Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para o segmento do Aeroporto Estadual de Araraquara, com velocidade operacional de 80 km/h.....	128
Figura 121 – Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para o segmento do Aeroporto Estadual de Araraquara, com velocidade operacional de 100 km/h.....	129
Figura 122 - Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para o segmento da Embrapa Pecuária Sudeste, com velocidade operacional de 20km/h	129
Figura 123 - Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para o segmento da Embrapa Pecuária Sudeste, com velocidade operacional de 40km/h	130
Figura 124 – Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para o segmento da Embrapa Pecuária Sudeste, com velocidade operacional de 60km/h	130
Figura 125 – Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para todos os trechos de coleta, com velocidade operacional de 20km/h	131
Figura 126 - Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para todos os trechos de coleta, com velocidade operacional de 40km/h	132
Figura 127 - Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para todos os trechos de coleta, com velocidade operacional de 60km/h	132
Figura 128 – Correlação entre a RMSVA (smartphone) e a velocidade operacional, para a extensão total de 500 metros da Estrada Municipal Guilherme Scatena	133
Figura 129 – Correlação entre a RMSVA (smartphone) e a velocidade operacional, para a extensão total de 500 metros do Aeroporto Estadual de Araraquara.....	133
Figura 130 – Correlação entre a RMSVA (smartphone) e a velocidade operacional, para a extensão total de 500 metros da Embrapa Pecuária Sudeste	134
Figura 131 – Esquema do filtro utilizado para aquisição de dados com o acelerômetro piezoresistivo	169
Figura 132 - Imagem do sistema de aquisição de dados montado para coleta dos perfis coletados em campo	169

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Erro na amplitude de acordo com o número de amostras por período.....	67
Tabela 2 - Comparação entre os valores de RMSVA obtidos pelo smartphone e acelerômetro (100 Hz) e acelerômetro piezoresistivo (1000 Hz), sem definição de intercepto no ponto de origem.....	98
Tabela 3 – Influência do ruído produzido pelo smartphone sobre os valores de RMSVA obtidos para trechos com diferentes níveis de irregularidade e velocidade operacional de 20 km/h....	99
Tabela 4 – Influência do ruído produzido pelo smartphone sobre os valores de RMSVA obtidos para trechos com diferentes níveis de irregularidade e velocidade operacional de 40 km/h..	100
Tabela 5 – Influência do ruído produzido pelo smartphone sobre os valores de RMSVA obtidos para trechos com diferentes níveis de irregularidade e velocidade operacional de 60 km/h..	100
Tabela 6 – Relação entre a condição do pavimento e o IRI (m/km)	119
Tabela 7 - Análise da repetitividade do índice RMSVA calculado para um total de 10 viagens na Estrada Municipal Guilherme Scatena	121
Tabela 8 - Análise da repetitividade do índice RMSVA calculado para um total de 10 viagens na via da Embrapa Pecuária Sudeste	121
Tabela 9 - Análise da repetitividade do índice RMSVA calculado para um total de 10 viagens na pista do Aeroporto Estadual de Araraquara	122
Tabela 10 – Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 20 km/h	164
Tabela 11 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 40 km/h.....	164
Tabela 12 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 60 km/h.....	164
Tabela 13 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 20 km/h.....	164
Tabela 14 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 40 km/h.....	165
Tabela 15 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 60 km/h.....	165
Tabela 16 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 80 km/h.....	165
Tabela 17 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 100 km/h.....	165
Tabela 18 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 20 km/h.....	165
Tabela 19 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 40 km/h.....	166
Tabela 20 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 60 km/h.....	166

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AASHO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
APL	Analizador de Perfil Longitudinal
ARAN	<i>Automatic Road Analyser</i>
ARRB	<i>Australian Road Research Board</i>
ARS	<i>Average Rectified Slope</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BPR	<i>Bureau of Public Roads</i>
CHLOE	<i>Carey, Huckins, Leathers and other Engineers</i>
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
COV	Custos Operacionais dos Veículos
DC	<i>Direct Current</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IRI	<i>International Roughness Index</i>
IRRE	<i>International Road Roughness Experiment</i>
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
MERLIN	<i>Machine for Evaluating Roughness Using Low-Cost Instrumentation</i>
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
OSM	<i>OpenStreetMap</i>
PPS	<i>Pavement Profile Scanner</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>

PSR	<i>Present Serviceability Rating</i>
QI	Quociente de Irregularidade
RARS ₈₀	<i>“Reference” Average Rectified Slope a 80 km/h</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RMSVA	<i>Root Mean Square Vertical Acceleration</i>
RTRRMS	<i>Response Type Road Roughness Measurement Systems</i>
SGP	Sistema de Gerência de Pavimentos
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
TRL	<i>Transport Research Laboratory</i>
USP	Universidade de São Paulo
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>
VDOT	<i>Virginia Department of Transportation</i>
VIMS	<i>Vehicular Intelligent Systems</i>
VSA	Valor de Serventia Atual

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo geral.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Justificativa	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Irregularidade longitudinal dos pavimentos.....	5
2.2 Breve histórico da mensuração da irregularidade longitudinal dos pavimentos.....	9
2.3 Smartphones como alternativa na avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos	22
3 MÉTODO	41
3.1 Obtenção dos índices de irregularidade de referência	41
3.2 Levantamento da irregularidade a partir de um smartphone.....	45
3.2.1 Escolha do modelo de smartphone.....	45
3.2.2 Aplicativo utilizado na coleta de dados com smartphones	46
3.2.3 Escolha do suporte	47
3.2.4 Modelo do veículo	49
3.2.5 Processamento dos dados.....	49
3.2.6 Testes de vibração com smartphones.....	50
3.2.7 Espectro em frequência dos perfis coletados em campo.....	52
3.2.8 Análise do aplicativo como variável nos resultados obtidos	53
3.2.9 Cálculo de valores de RMSVA com smartphones.....	54
3.3 Resumo do método.....	54
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	57
4.1 Resultados obtidos pelo método de nível e mira.....	57
4.2 Resultados obtidos pelos smartphones.....	61
4.2.1 Testes de vibração com smartphones.....	61
4.2.2 Espectro em frequência dos perfis coletados em campo.....	69
4.2.3 Análise do aplicativo utilizado nas coletas de campo.....	108
4.3 Relação entre os dados obtidos pelo método de nível e mira e pelo smartphone	123
4.3.1 Correlação do RMSVA do smartphone com o IRI do nível e mira	123

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS E DESENVOLVIMENTOS	135
5.1 Conclusões.....	135
5.2 Sugestões para futuros trabalhos e desenvolvimentos.....	138
REFERÊNCIAS.....	139
APÊNDICE A	145
APÊNDICE B	154
APÊNDICE C	164
ANEXO A.....	167
ANEXO B	169
ANEXO C.....	170
ANEXO D.....	172
ANEXO E	174

1 INTRODUÇÃO

Para o usuário, a condição de um pavimento está associada à sua aparência (trincas, remendos, cor, condição dos acostamentos, entre outros) e à aceleração vertical percebida durante a condução do veículo, causada, principalmente, pela irregularidade longitudinal do pavimento, que tem sua resposta filtrada ao usuário pelas características do veículo utilizado (HAAS *et al.*, 1994).

Essa percepção de valor por parte do usuário é justificável, uma vez que a irregularidade compromete o propósito para o qual o pavimento é construído: proporcionar suavidade, conforto e segurança no rolamento, como definido por Carey e Irick (1960), que relacionaram a irregularidade longitudinal como o principal defeito ligado ao conceito de serventia-desempenho dos pavimentos.

Além de afetar o conforto e segurança dos motoristas e passageiros, a irregularidade longitudinal compromete a vida útil do pavimento, uma vez que o efeito dinâmico imposto pelos veículos que trafegam sobre a via, principalmente os pesados, como ônibus e caminhões, cresce nos arredores das irregularidades, o que acelera a deterioração da estrutura (FERNANDES JR. e BARBOSA, 2000).

Esse processo se reflete em custos para as concessionárias e órgãos públicos que administram as rodovias, devido aos serviços de manutenção e reabilitação que precisam ser aplicados aos pavimentos, de modo a manter a irregularidade longitudinal em níveis aceitáveis, de acordo com a classe da via (SAYERS e KARAMIHAS, 1998).

Em decorrência dos problemas causados pela irregularidade longitudinal dos pavimentos, faz-se necessária a mensuração desse defeito, que é realizada por diferentes tipos de dispositivos e quantificado principalmente pelo IRI – *International Roughness Index*, padronizado pelo Banco Mundial em 1986.

Esses equipamentos são classificados de acordo com a forma pela qual a irregularidade é obtida (SAYERS, 1990). Apesar de existirem diversos métodos de mensuração desse defeito, há conflitos entre as diferentes classes desses sistemas, envolvendo acurácia e conveniência (DOUANGPHACHANH e ONEYAMA, 2013). Em outras palavras, ainda não há uma forma

de medir a irregularidade longitudinal dos pavimentos com, simultaneamente, precisão e exatidão, alto rendimento e baixo custo.

Muitos sistemas utilizam perfilômetros e ferramentas sofisticadas, que têm alto custo de aquisição e operação, e muitas vezes exigem habilidade dos operadores. Em outros casos, são utilizados equipamentos estáticos de precisão, mas que não são práticos para levantamentos em nível de rede. Também é possível a aplicação de avaliações subjetivas, de prática popular em muitos países em desenvolvimento. No entanto, essa não é uma tarefa simples.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo desta pesquisa é analisar o potencial da avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com dados coletados por smartphones.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com base no estudo, pretende-se avaliar:

- a) o potencial dos smartphones em produzir dados compatíveis com a irregularidade longitudinal dos pavimentos, com variação da velocidade do veículo e em trechos com diferentes níveis de irregularidade;
- b) a repetitividade dos dados fornecidos pelos smartphones em termos de RMSVA, por meio do desvio padrão e coeficiente de variação das amostras coletadas.

1.3 JUSTIFICATIVA

A mensuração contínua da irregularidade longitudinal dos pavimentos pode proporcionar um melhor entendimento sobre as possíveis causas da propagação desse defeito em diferentes trechos, bem como alertar sobre quais segmentos da estrada precisam de maior atenção por parte da gerência de pavimentos, de acordo com a criticidade de sua condição. Nesse sentido, pretende-se investigar o potencial de smartphones¹ para a avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos pois, apesar das publicações de recentes pesquisas internacionais, que utilizaram diferentes abordagens para relacionar os dados fornecidos por esses dispositivos com a irregularidade longitudinal dos pavimentos, terem alcançado resultados positivos, ainda restam dúvidas sobre a qualidade e a forma de aplicação dos sinais medidos por esses aparelhos. Os smartphones podem, portanto, ser uma alternativa aos equipamentos atualmente disponíveis

¹ O termo já faz parte da língua portuguesa.

para mensuração da irregularidade longitudinal de pavimentos, uma vez que podem gerar informações à respeito da qualidade de rolamento de estradas com nível de qualidade aceitável para um SGP em nível de rede (coleta de informações agregadas referentes a toda malha viária) e auxiliar outros equipamentos de precisão utilizados para a gerência em nível de projeto (coleta de informações detalhadas, referentes a seções específicas do pavimento) devido principalmente ao seu baixo custo, facilidade de operação e alta produtividade.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação é dividida em cinco capítulos, em que o Capítulo 1 apresenta a contextualização do trabalho, sua justificativa, o problema da pesquisa, os objetivos gerais e específicos, o método utilizado e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma breve revisão de obras que discutem a irregularidade longitudinal dos pavimentos, os equipamentos utilizados para sua mensuração e a possibilidade do uso do smartphones para avaliação desse defeito.

O Capítulo 3 descreve os métodos utilizados para alcançar os objetivos deste trabalho, dentre eles: obtenção de índices de irregularidade de referência sobre os trechos de pavimentos selecionados para este estudo; coleta de dados de um smartphone que possam ser relacionados à irregularidade longitudinal dos pavimentos; avaliação dos sinais fornecidos pelos acelerômetros pré-instalados nesses aparelhos; investigação da influência das características de irregularidade dos perfis coletados em campo.

O Capítulo 4 apresenta a análise e interpretação dos resultados obtidos em testes de vibração e em coletas de campo com smartphones, dos valores de RMSVA obtidos a partir dos sinais fornecidos por esses aparelhos e do IRI calculados com os dados levantados pelo Nível e Mira. Os resultados alcançados com os dados dos smartphones também são comparados com aqueles obtidos com o levantamento topográfico, a fim de verificar a correlação dos dados fornecidos por essas ferramentas com a irregularidade longitudinal dos pavimentos.

Finalmente, no Capítulo 5, apresentam-se as conclusões obtidas a partir da análise dos resultados desta pesquisa e de outros estudos incluídos na revisão bibliográfica, assim como sugestões para futuras pesquisas e desenvolvimentos relacionados ao uso de smartphones para avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão de obras que discutem conceitos associados à irregularidade longitudinal dos pavimentos, sua importância e os métodos utilizados para sua mensuração. Também será discutido o uso de smartphones para essa avaliação: quais as vantagens oferecidas pelo dispositivo para esse fim e como isso pode ser feito.

2.1 IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DOS PAVIMENTOS

A percepção da qualidade do pavimento pelo usuário está associada à sua aparência (trincas, remendos, cor, condição dos acostamentos, entre outros) e, principalmente, à aceleração vertical experimentada durante a viagem dentro de um veículo. Essa vibração, por sua vez, depende das características de irregularidade do pavimento, da massa do veículo, de seus parâmetros de suspensão e velocidade operacional. O veículo funciona como um filtro mecânico, que dificulta a relação entre a sensibilidade do usuário e as características da superfície do pavimento (HAAS *et al.*, 1994).

A irregularidade em pavimentos pode surgir de problemas construtivos ou por defeitos causados pela ação do tráfego e/ou do clima, especialmente as deformações permanentes do revestimento e subleito. Como explica o Manual de Gerência de Pavimentos do DNIT (2011), deve-se ter em mente que a irregularidade longitudinal dos pavimentos não deve ser entendida como apenas mais um defeito de superfície, mas sim como um parâmetro que retrata as consequências geradas às condições de rolamento dos veículos por um conjunto de defeitos do pavimento.

A norma ASTM E 1926-98 define a irregularidade longitudinal dos pavimentos como: “[...] Os desvios de uma superfície, em relação a uma superfície plana de referência, com características dimensionais que afetam a dinâmica dos veículos, a qualidade de rolamento, as cargas dinâmicas e a drenagem.” De forma similar, mas, imprecisa, por não citar a drenagem como um dos elementos afetados pela irregularidade longitudinal de pavimentos, a norma brasileira DNER-PRO 164/94 utiliza a seguinte definição: “o desvio da superfície da rodovia, em relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade de rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via”. A Figura 1 apresenta um esquema que ilustra esse defeito.

Figura 1 – Esquema para ilustrar a Irregularidade longitudinal dos pavimentos (http://www.usp.br/ldsv/?page_id=217)

Existem outras tantas definições relacionadas a essas deformações manifestadas na superfície dos pavimentos. Fato é que elas causam vários inconvenientes, sobretudo um desconforto que é facilmente percebido pelos usuários. Não por acaso, é apontado como o principal defeito ligado à avaliação funcional de pavimentos, baseado no conceito de serventia-desempenho desenvolvido por Carey e Irick em 1960, decorrente dos experimentos do *AASHO Road Test*. Tal percepção é legítima, uma vez que a irregularidade compromete a finalidade para a qual o pavimento é construído: proporcionar suavidade, conforto e segurança no rolamento.

A irregularidade de um pavimento também influencia na dirigibilidade de um veículo, por alterar as forças normais que atuam na interface pneu-pavimento e modificar as forças laterais necessárias para controlar o veículo. Em pavimentos com menor nível de irregularidade a variação da força normal é muito pequena. No entanto, em pavimentos muito irregulares, estas variações podem ser muito grandes e reduzir de forma significativa a força lateral disponível para manter a estabilidade do veículo. Em situações em que é necessário um nível de atrito lateral mínimo para se fazer uma manobra, essa redução de força pode levar a acidentes (BESTER, 2002).

Além de afetar o conforto e a segurança de motoristas e passageiros, a irregularidade longitudinal compromete a vida útil do pavimento, já que os desvios verticais da superfície de rolamento afetam a componente dinâmica da força e, com isso, contribuem para o aumento da própria irregularidade (HEGMON, 1992). Tais impactos já foram estimados em simulações computacionais e mostraram intensificar, de forma não-linear, a progressão dos defeitos, principalmente em altas velocidades (FERNANDES JR. e BARBOSA, 2000).

Como consequência, a caracterização e mensuração da irregularidade de pavimentos é uma grande preocupação de engenheiros rodoviários em todo o mundo. De acordo com Gillespie *et al.* (1986), à medida que as redes rodoviárias são concluídas, a manutenção de uma qualidade aceitável mínima começa a ganhar importância em termos de custos. Assim, a coleta de informações sobre a irregularidade é fator importante para os sistemas de gerência de pavimentos rodoviários, pois influencia na tomada de decisão sobre os investimentos para manutenções e reabilitações.

A análise e interpretação desse defeito pode ajudar no diagnóstico do processo de deterioração da estrada. Estudos mostram que 95% das informações relativas à serventia dos pavimentos nos testes originais do *AASHO Road Test* estão ligadas exclusivamente à irregularidade longitudinal dos pavimentos (HAAS *et al.*, 1994). Não por acaso, a ASTM aponta a irregularidade como uma das maiores prioridades entre os dados de desempenho para a gerência de pavimentos rodoviários, tanto em nível de rede quanto em nível de projeto (ASTM E1777-96).

Embora os investimentos rodoviários, públicos e privados, para a construção de um novo pavimento sejam significativos no início de sua execução, bem como no decorrer das principais atividades de manutenção e reabilitação da estrutura, os custos dos usuários são substancialmente maiores quando se considera toda a frota de veículos que o utiliza, sendo representados pelos Custos Operacionais dos Veículos (COV) e estimados por vários modelos da literatura (ZANIEWSKI *et al.*, 1982; CHATTI e ZAABAR, 2012; CHATTI e ZAABAR, 2014).

Os custos dos órgãos rodoviários incluem a construção inicial, manutenção, reabilitação e administração de engenharia, enquanto as despesas dos usuários são representadas pelos custos operacionais dos veículos, que incluem o consumo de combustível, óleo, reparo e substituição dos pneus, manutenção e reparação de veículos, depreciação, perda de tempo nas viagens e desconforto e/ou lesão de motoristas e passageiros. Tais custos são altamente relacionados com a irregularidade longitudinal dos pavimentos e superam, de forma expressiva, os custos dos órgãos rodoviários (BUTTLAR e ISLAM, 2012).

É plenamente justificada a mensuração da irregularidade longitudinal de pavimentos, o que pode ser feito por diferentes dispositivos, com quantificação principalmente pelo IRI - *International Roughness Index*, escolhido como o principal índice de irregularidade no IRRE - *International Road Roughness Experiment*, realizado no Brasil, em 1982, e padronizado pelo Banco Mundial em 1986.

De acordo com Gillespie *et al.* (1986), o IRI foi escolhido como índice de irregularidade padrão, dentre outros candidatos, porque 1) foi o que mais se aproximou do conceito dos sistemas medidores do tipo resposta (muito utilizados naquela época, principalmente por seu baixo custo e alto rendimento), 2) por alcançar maior acurácia para os sistemas medidores do tipo resposta e 3) por apresentar maior compatibilidade com os métodos perfilométricos, quando comparado com qualquer outro índice. Além disso, como o IRI pode ser calculado com os dados coletados por diversos equipamentos, como indicado pelo Banco Mundial, é também o índice mais apropriado quando uma medida de irregularidade tem a intenção de obter: o custo operacional dos veículos em geral, a qualidade de rolamento global, a carga dinâmica das rodas (ou seja, danos aos pavimentos causados pela passagem de veículos), os limites de segurança para automóveis durante as curvas e frenagens e o estado geral de superfície, a qual resume as características de irregularidade que afetam a resposta dos veículos (SAYERS e KARAMIHAS, 1998).

Desde o século passado, quando surgiram os primeiros dispositivos para medir a qualidade de rolamento dos pavimentos, como o Viagraph, o Via-log, o BPR – *Bureau of Public Roads*, o perfilógrafo do Departamento de Transportes de Illinois, o perfilômetro CHLOE, utilizado para medir a irregularidade longitudinal dos pavimentos experimentais do *AASHO Road Test* na década de 1960, até os dias atuais, muitos outros instrumentos foram testados e desenvolvidos para esse fim.

De acordo com Gillespie *et al.* (1986), os medidores de irregularidade longitudinal dos pavimentos são classificados em quatro classes, com base em quão diretamente conseguem medir esse defeito e no intervalo de amostragem utilizado. Dessa forma, um equipamento pode ser enquadrado em mais de uma, dentre as seguintes classes:

- Classe 1 – Equipamentos de precisão que medem diretamente o perfil dos pavimentos (Nível e Mira, *Dipstick*, z-250, perfilômetro do TRL, perfilômetro *Walking Profiler* da ARRB - *Australian Road Research Board* etc.);
- Classe 2 - Outros métodos perfilométricos (perfilógrafos, equipamentos com sensores a laser, infravermelho ou ultrassom, APL francês - *Longitudinal Profile Analyser* etc.);
- Classe 3 - Sistemas medidores do tipo resposta (integrador de irregularidade longitudinal IPR/USP, *Maysmeter*, MERLIN, *Riley*, *TRL Bump integrator* etc.);
- Classe 4 - Avaliações subjetivas (painel de avaliadores).

Apesar da variedade de técnicas disponíveis para avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos, existem conflitos entre as diferentes classes desses métodos, que envolvem acurácia e conveniência (BUTTLAR e ISLAM, 2014; DOUANGPHACHANH e ONEYAMA, 2014). Em outras palavras, ainda não há uma forma de medir esse defeito com, simultaneamente, precisão e exatidão, alto rendimento e baixo custo.

Muitos sistemas utilizam perfilômetros e ferramentas sofisticadas, com alto custo de aquisição e operação, e muitas vezes demandam habilidade de seus operadores. Também são utilizados equipamentos estáticos de precisão, mas que não são práticos para levantamentos em nível de rede devido à sua baixa produtividade. Há ainda a possibilidade da aplicação de avaliações subjetivas, de prática comum em países em desenvolvimento. No entanto, é uma tarefa trabalhosa e demorada. A falta de recursos também leva muitas agências a recorrer a modelos de previsão que, embora úteis, podem falhar tanto nas medições de referência, quanto pelas considerações utilizadas nos modelos.

Nesse sentido, a escolha da técnica mais adequada para medir a irregularidade depende da finalidade para a qual os resultados serão gerados, do tempo disponível e dos recursos financeiros da agência responsável pela administração da rodovia. A norma ASMT E 1777-96, que trata da priorização dos dados necessários para um SGP, esclarece que embora a irregularidade seja de grande importância mesmo para baixos volumes de tráfego, isso não implica que um certo tipo de equipamento tenha de ser utilizado para aquisição de dados. Sayers e Karamihas (1998) explicam que para o controle em nível de rede é suficiente determinar os níveis de irregularidade com base na segmentação da estrada em trechos de comprimento administrável. No entanto, para trabalhos de diagnóstico e pesquisa é conveniente saber localizar exatamente onde um pavimento é irregular e onde é suave. Assim, alguns sistemas de medida são mais apropriados para um SGP em nível de rede e outros em nível de projeto.

2.2 BREVE HISTÓRICO DA MENSURAÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DOS PAVIMENTOS

Hveem (1960) relata que um dos primeiros equipamentos desenvolvidos no começo do século XX para a mensuração da irregularidade longitudinal dos pavimentos, foi o Viagraph (Figura 2). Tratava-se de um equipamento rudimentar que tentava medir a irregularidade, com registro contínuo em papel, a partir do desvio medido no ponto central de uma régua de madeira, que

era apoiada e arrastada longitudinalmente sobre o pavimento. Os desvios verticais já eram somados em relação à distância percorrida.

No entanto, a régua que compunha essa ferramenta só conseguia medir de forma adequada comprimentos de onda menores do que o comprimento da régua utilizada, além de sofrer com o desgaste ao ser arrastada. Para diminuir esse desgaste, foram adicionadas duas rodas ao equipamento. Com dois pontos de apoio nas extremidades da régua, a resposta do equipamento se tornou variável de acordo com a sua posição, o seu comprimento total e o comprimento de onda por onde passava. Por esse motivo, mais rodas foram sendo adicionadas à essa ferramenta. Esse processo resultou no desenvolvimento dos perfilógrafos (GILLESPIE, 1992).

Figura 2 – Viagraph: um dos primeiros equipamentos construídos para medir a irregularidade longitudinal dos pavimentos (HVEEM, 1960)

O número e a disposição das rodas, e o comprimento da régua são as principais diferenças de design dos perfilógrafos (Figura 3). As vantagens dos perfilógrafos incluem o baixo custo inicial, a fácil operação e a alta repetitividade. As desvantagens incluem a baixa velocidade operacional e a incapacidade de medir a irregularidade em comprimentos de onda harmônicos ao seu vão (HAAS *et al.*, 1994).

De acordo com Gillespie (1992), devido às características de cada um dos equipamentos, também se observava uma variação nas propriedades de resposta desse sistema, o que impossibilitava um avanço em direção ao consenso sobre uma medida universal e padronizada da irregularidade longitudinal dos pavimentos.

Figura 3 - Imagem esquemática de um perfilógrafo (HAAS *et al.*, 1994)

Por volta de 1920, os engenheiros rodoviários reconheceram que as propriedades de irregularidade das estradas eram os maiores responsáveis por causar vibrações dos veículos motores. Essa concepção foi evidenciada pelo equipamento "Via-Log", desenvolvido pelo Estado de Nova York. Esse instrumento media o nível de irregularidade do pavimento por meio do deslocamento da suspensão de um automóvel de passageiros que acionava o registro desses desvios com a marcação de uma tira de papel por uma caneta (Figura 4). Mais tarde, os dispositivos que registraram o movimento da suspensão foram modificados para somar o movimento em um contador mecânico, para então medir a irregularidade como um índice estatístico, dado em polegadas por milha (HVEEM, 1960).

Figura 4 – Unidade de gravação do Via-Log (HVEEM, 1960)

Nas décadas seguintes, a dificuldade em obter medidas consistentes com esse método, devido às variações na dinâmica dos veículos motores, levou à tentativa de padronizar o veículo. Com isso, foi desenvolvido em 1941 o medidor conhecido como BPR - *Bureau of Public Roads* (Figura 5), sigla referente ao nome do órgão que mais tarde se tornou a FHWA – *Federal Highway Administration*, dos EUA. O BPR *Roughometer* era formado por um trailer de uma roda, no qual todas as dimensões, propriedades de massa, pneus e suspensões, foram padronizadas com o esforço de alcançar um mecanismo reproduzível (GILLESPIE, 1992).

Figura 5 - BPR *Roughometer* (Adaptada de GILLESPIE, 1992)

Outra ferramenta histórica para a mensuração da irregularidade longitudinal dos pavimentos, desenvolvida durante os experimentos realizados na *AASHO Road Test*, foi o CHLOE (um acrônimo formado pelas primeiras letras dos nomes dos inventores), ilustrado na Figura 6. Como na época do experimento não haviam equipamentos mecânicos ou dispositivos para medir perfis reais dos pavimentos, foi preciso produzir um instrumento que tornasse possível a correlação entre os métodos até então utilizados para avaliar a condição dos pavimentos, como o PSR – *Present Serviceability Rating*, índice subjetivo que define o Valor de Serventia Atual (VSA) do pavimento. Assim, o CHLOE foi utilizado no desenvolvimento do conceito de serventia de pavimentos por Carey e Irick em 1960, o que representou um avanço significativo para os atuais engenheiros rodoviários (HAAS *et al.*, 1994).

Segundo Gillespie (1992), o CHLOE era formado por um reboque transportado em baixa velocidade, sobre o qual foram montadas duas pequenas rodas separadas por uma distância de aproximadamente 23 cm. O instrumento era composto por um integrador, responsável por medir e registrar a variação da inclinação da estrada, estatística de irregularidade dada em polegadas por milha. De acordo com Haas *et al.* (1994), o equipamento possuía boa

repetitividade, mas era lento e não conseguia medir comprimentos de onda maiores que 3,7 metros. Por esses motivos, apesar de sua importância histórica, o CHLOE não é mais utilizado nos levantamentos de irregularidade atuais.

Figura 6 – Desenho esquemático do perfilômetro CHLOE (HAAS *et al.*, 1994)

Na década de 1960, surgiram equipamentos capazes de medir a irregularidade com maior rendimento, por meio da obtenção do deslocamento do eixo de um veículo, ou de um reboque, em relação à sua carroceria, sendo tal desvio somado somente em um único sentido, quando o eixo se afasta ou se aproxima da carroceria. Esse índice de irregularidade é dado em termos da soma acumulada desses deslocamentos verticais em relação à distância longitudinal percorrida, comumente dado na unidade de m/km, mm/m ou polegadas/milha. São dispositivos de menor custo, que podem ser montados em qualquer automóvel disponível, como mostrado na Figura 7. Essa classe de medidores ficou conhecida como Sistemas Medidores de Irregularidade Rodoviária do Tipo Resposta (*Response-Type Road Roughness Measurement Systems - RTRRMS*). Os equipamentos mais famosos dessa classe são o *Mays Road Meter* (*Mays Meter*), o *PCA Road Meter* e o *Bump Integrator* (GILLESPIE, 1992).

Figura 7 – Figura esquemática de um Sistema Medidor de Irregularidade Rodoviária do Tipo Resposta (Adaptada de GILLESPIE, 1992)

Devido à sua simplicidade e baixo custo, os medidores do tipo resposta foram amplamente utilizados na década de 1970. Embora pudessem medir de maneira confiável tanto estradas ruins com alta irregularidade, quanto pavimentos suaves com baixa irregularidade, não possuíam acurácia suficiente para boa parte das aplicações de engenharia. Como era de se esperar, não existem dois medidores do tipo resposta que possam fornecer medidas idênticas, devido às diferenças na dinâmica dos veículos. Além disso, também apresentam desempenho variável com o passar do tempo, mesmo para medidas individuais. Ações rotineiras como a adição de combustível ou passageiros, ajuste da pressão dos pneus, balanceamento de pneus, entre outros, mudavam a “calibração” desses dispositivos (GILLESPIE, 1992).

As limitações de acurácia dos medidores do tipo resposta, resultantes da variação da resposta de cada sistema à irregularidade longitudinal dos pavimentos devido às suas características dinâmicas individuais, geram erros aleatórios durante a mensuração desse defeito. De acordo com Gillespie *et al.* (1980), a ocorrência desses erros aleatórios não tem efeito grave em levantamentos em nível de rede, nos quais se trabalha com distâncias médias para resumir as estatísticas que descrevem a condição da rede rodoviária. No entanto, os erros limitam a aplicação do equipamento para medições em segmentos individuais, necessárias para a tomada de decisões sobre atividades de manutenção ou para avaliação da qualidade da construção de novas estradas.

A resposta do veículo às irregularidades dos pavimentos depende da velocidade, das propriedades do veículo, e do nível de irregularidade. Isso significa que a resposta do veículo não é a mesma para todas as frequências. Ao invés disso, ela amplifica ou atenua a resposta em algumas frequências (Figura 8). A irregularidade, em amplitude e frequência repetidas, pode gerar dois efeitos: 1) se a frequência está em fase com o veículo, uma estrada irregular pode parecer suave; 2) se a irregularidade está fora de fase com a frequência natural, a irregularidade pode ser amplificada (BESTER, 2002).

Essa resposta caracteriza o efeito dinâmico do veículo na mensuração da irregularidade do pavimento por meio do ganho relativo dado ao perfil do pavimento pelo movimento do corpo do veículo, que é obtido pelo medidor do equipamento. Ou seja, as irregularidades do pavimento são filtradas pela resposta do veículo, que varia de acordo com suas características (GILLESPIE *et al.*, 1980).

Figura 8 – Influência do perfil da estrada e do veículo para a densidade espectral da velocidade no eixo do corpo do veículo (Adaptada de GILLESPIE *et al.*, 1980)

Ainda na década de 1960, houve grande avanço na mensuração da irregularidade longitudinal dos pavimentos, em relação ao rendimento e à precisão de coleta, por meio do desenvolvimento do perfilômetro inercial por Elson Spangler e William Keller, no laboratório de pesquisas da *General Motors* (SAYERS e KARAMIHAS, 1998). De acordo com Barella (2008), esse perfilômetro passou por mudanças até ser conhecido finalmente como perfilômetro GMR - *General Motors Research*, que possuía uma roda apalpadora suportada por uma haste inclinada, e era separada das rodas do veículo, que mantinham contato com o pavimento. Com o registro do movimento inercial do automóvel (aceleração vertical) e da haste, era possível levantar o perfil longitudinal do pavimento.

De acordo com Gillespie *et al.* (1986), os perfis gerados pelo GMR passavam por um simulador que tentava reproduzir a passagem de um quarto de carro, um conjunto formado por massa, mola, amortecedor e pneu, similar ao equipamento BPR *Roughometer*, com o objetivo de calcular índices estatísticos relacionados à irregularidade longitudinal dos pavimentos. Esse processo ficou conhecido como *Quarter-Car-Simulation* – QCS e o índice gerado desta forma ficou conhecido como *Quarter-Car Index* – QI (Figura 9). Segundo Queiroz (1981), o índice QI gerado pelo QCS tem unidades de comprimento por comprimento, mas, para evitar confusões, convencionou-se trabalhar com as unidades em contagens por quilômetro.

Apesar do desenvolvimento do QI, os resultados obtidos não eram fiéis às medidas originais feitas por um BPR, já que cada veículo tem suas características próprias. Para enfrentar esse problema, o Banco Mundial propôs experimentos não só com o objetivo de testar os medidores de irregularidade do tipo resposta representativos daquela época, mas principalmente para incentivar a busca para a solução de um problema mais amplo: a obtenção de medidas de irregularidade comparáveis (para entrada de dados em modelos de custos rodoviários). Ou seja,

havia a necessidade de uma escala de irregularidade padrão, que fosse estável ao longo do tempo e reprodutível, para permitir a comparação das medições feitas pelos diversos equipamentos disponíveis, em qualquer parte do mundo.

Figura 9 - Representação do modelo quarto de carro e gráfico de resposta da suspensão em diferentes frequências (Adaptada de SAYERS e KARAMIHAS, 1998)

A partir disso, foram realizados testes em 1982, na chamada *International Road Roughness Experiment - IRRE*, conduzida no Brasil, que teve papel decisivo nesse projeto e foi um marco mundial em termos de avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos. O experimento levou ao desenvolvimento do IRI. O índice teve como referência o modelo quarto-de-carro, porém, com uso de parâmetros de um automóvel conhecido. A descrição matemática (modelo) processa as medições diretas de um perfil para obtenção dos valores numéricos da irregularidade, a partir da média retificada da inclinação (ARS – *Average Rectified Slope*). O modelo matemático inclui parâmetros de um veículo padrão, conhecido como *Golden Car*: massa suspensa, massa não suspensa, mola e amortecedor (suspensão), e pneu. Por questões práticas e técnicas, o cálculo é feito com a velocidade constante de 80 km/h. Esses parâmetros são usados no modelo, que busca simular o movimento do conjunto que forma o semieixo do veículo (GILLESPIE *et al.*, 1986).

No mesmo período dos experimentos que levaram aos procedimentos de calibração dos medidores do tipo resposta, e que estimularam a padronização do índice de irregularidade IRI, outros equipamentos começaram a ganhar espaço, dentre eles o perfilômetro inercial, que, como já citado nesta revisão, teve no GMR sua primeira versão, ainda na década de 1960.

O funcionamento básico de um perfilômetro inercial se dá por meio do uso de um acelerômetro, para medir as acelerações verticais do eixo do veículo. Esses sinais são processados por algoritmos que transformam as acelerações medidas em uma referência inercial, que define a altura instantânea do sensor fixado ao veículo. Já a altura do solo em relação à essa referência é dada pela distância entre o acelerômetro e a superfície sob o sensor. Essa altura é medida com um sensor sem contato, tal como um transdutor laser (também podem ser utilizados outros sistemas, como o infravermelho e o ultrassom). A distância longitudinal dos instrumentos é geralmente retirada do velocímetro do veículo. Um computador e vários produtos eletrônicos alimentam os sensores e os conectam ao computador de bordo (SAYERS e KARAMIHAS, 1998). A Figura 10 ilustra o funcionamento básico desse sistema.

Figura 10 - Esquema do funcionamento de um perfilômetro inercial (Adaptada de SAYERS e KARAMIHAS, 1998)

Outro medidor de irregularidade longitudinal dos pavimentos, que se tornou conhecido no final da década de 1970, é o APL – *Longitudinal Profile Analyser* (Analisador de Perfil Longitudinal) francês, projetado pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (Laboratório Central de Pontes e Estradas). O dispositivo foi criado com o objetivo de determinar o perfil longitudinal dos pavimentos dentro de uma faixa de frequência de vibrações entre 0,5 e 40 Hz. O aparelho pode ser utilizado sobre qualquer tipo de superfície, pavimentada ou não, e sob diferentes condições ambientais. O APL deve ser rebocado por um veículo motor. A ligação com o eixo cardan assegura que o movimento do veículo interaja com os sinais gravados pelo APL (CAICEDO *et al.*, 2003). O sistema de medição completo é apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Esquema do APL francês (Adaptada de *Service technique de l'aviation civile*)

A irregularidade medida pelo APL pode ser obtida com velocidades específicas. Caso a velocidade de coleta seja de 21,6 km/h, tem-se o índice APL 25, a 72 km/h o índice é chamado de APL 72. O comprimento dos segmentos deve estar de acordo com esse índice. Para o APL 25, os segmentos são múltiplos inteiros de 25 m, e para o APL 72, são múltiplos de 200 m. Na Bélgica, os sinais do APL são analisados para produzir um índice específico, chamado Coeficiente de Uniformidade (CP), que é baseado em uma média móvel, e computados para seções de 100 m (GILLESPIE *et al.*, 1986). Segundo Caicedo *et al.* (2003), o APL foi modificado para o princípio de navegação inercial, baseada no registro das acelerações registradas e posterior cálculo dos deslocamentos por meio da dupla integral dos dados coletados.

Em 2002 foi desenvolvido o *Pavement Profile Scanner* – PPS-2000 (Figura 12), pela empresa *Phoenix Scientific Inc* (2004). O PPS utiliza um único sensor que mede simultaneamente o perfil transversal e longitudinal dos pavimentos, por meio de um feixe laser que trabalha em conjunto com um espelho. Assim, consegue escanear milhares de pontos por segundo, com capacidade para cobrir toda a largura da faixa dos pavimentos. O equipamento é utilizado também para identificar outros defeitos, como as juntas de concreto com falhas, as trincas e panelas, a qualidade das marcações nas estradas, a altura e o perfil das calçadas, etc. Atualmente esse tipo de equipamento também é comercializado por outros fabricantes.

Nos perfilômetros inerciais a laser ou nos medidores capazes de escanear milhares de pontos por segundo, cada sensor é calibrado de forma independente. Isso significa que é possível apenas calibrar cada sensor, baseado em alguma medida de referência. Isto é, pode-se determinar uma altura conhecida para verificar o funcionamento do sensor de distância (laser,

infravermelho ou ultrassom). No entanto, Sayers e Karamihas (1998) explicam que é errado calibrar perfilômetros inerciais a partir de índices de irregularidade (como o IRI) obtidos por outros sistemas, pois as condições pontuais que contribuem para o índice de irregularidade de um perfil verdadeiro geralmente são únicas para esse perfil.

Figura 12 – Medidor PPS-2000 (*Phoenix Scientific Inc*, 2004)

No entanto, é possível investigar o valor de um índice de irregularidade calculado a partir de um perfilômetro, comparando-o a uma referência, o que é considerado um teste de verificação. De acordo com Sayers e Karamihas (1998), se o resultado dessa verificação não for satisfatório dentro das condições do teste, o perfilômetro não será válido para essa condição e o fabricante deverá ser contatado.

Um estudo de acurácia válido, que usa um índice de irregularidade de referência, deve utilizar instrumentos que possam medir a faixa dos comprimentos de onda que o índice selecionado abrange. Para o índice IRI, essa faixa vai de aproximadamente 1,3 a 30 metros. Nesses casos, pode-se utilizar o método de Nível e Mira ou um *Dipstick*. Esse processo é importante mesmo para perfilômetros inerciais. Sem isso, apenas a repetitividade de um perfilômetro ou a concordância entre vários perfis podem ser avaliadas (KARAMIHAS *et al.*, 1999).

Nessas situações e principalmente para calibrar os medidores do tipo resposta, existem alguns equipamentos que podem ser empregados para obtenção de índices de irregularidade de referência. Tais índices são coletados a partir de sistemas que medem diretamente o perfil dos pavimentos (perfilômetros), como os equipamentos topográficos ou outros dispositivos manuais: Nível e Mira, *Dipstick*, z-250, perfilômetro do TRL, perfilômetro *Walking Profiler* da ARRB, entre outros.

O levantamento topográfico do perfil longitudinal feito por Nível e Mira (Figura 13) é o mais conhecido e disponível internacionalmente. É considerado um método demorado e trabalhoso, geralmente empregado para calibração de outros equipamentos de maior produtividade, principalmente medidores do tipo resposta, os quais dependem de uma escala de irregularidade de referência, conforme regulamenta a norma DNER-ES 173/86. Nesse caso, o levantamento longitudinal se dá nas trilhas de roda externa e interna, a cada 0,5 m.

Gillespie *et al.* (1986) recomendam um intervalo de amostragem de 0,25 m para equipamentos de medida enquadrados na classe 1 e 0,5 m para dispositivos da classe 2. Queiroz (1981) realizou um estudo sobre o processo de obtenção de uma escala estável de irregularidade a partir do método de Nível e Mira. O autor não encontrou diferenças significativas entre os valores medidos com intervalos de 0,1 até 0,5 m.

Figura 13 – Desenho esquemático do método de Nível e Mira (Adaptada de SAYERS e KARAMIHAS, 1998)

Quando se trata de perfilômetros portáteis, pode-se dizer que o *Dipstick* foi o precursor de uma categoria de equipamentos que se desenvolveu com maior intensidade nos anos 90. Instrumentos similares foram fabricados, como o z-250, mas também houve inovações, como o caso do *Walking Profiler* da empresa Australiana *ARRB Group Ltd* (2005), um dispositivo leve que é empurrado por um operador, como apresentado na Figura 14, ao lado do *Dipstick* (BARELLA, 2008).

Figura 14 - *Dipstick* (esquerda) e *Walking Profiler* (direita) (Adaptada de *Central Road Research Institute*)

Outro equipamento utilizado para avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos, ou calibração de medidores do tipo resposta, é o MERLIN - *Machine for Evaluating Roughness Using Low-Cost Instrumentation*. É considerado um medidor de classe 3, desenvolvido pelo TRL - *Transport Research Laboratory* da Inglaterra com objetivo de reduzir custos para países em desenvolvimento. O dispositivo é constituído por uma estrutura metálica de 1,8 metros de comprimento, com uma roda dianteira, um pé traseiro e uma ponta de prova que repousa sobre a superfície do pavimento (Figura 15). A ponta de prova está ligada a um braço móvel do qual, na outra extremidade, está um ponteiro que se move ao longo de um gráfico criado pelos movimentos da ponta de prova. O gráfico pode ser utilizado para estimar a irregularidade em termos de IRI (CUNDILL, 1991).

Figura 15 – MERLIN (MORROW *et al.*, 2006)

Morrow *et al.* (2006) realizaram um estudo comparativo entre diversos equipamentos utilizados para calibração de sistemas de maior rendimento, principalmente os medidores do tipo resposta. Os autores trabalharam com o z-250, com o *Walking Profilometer*, com o MERLIN, com o *Riley* (construído nos mesmos princípios que o MERLIN, porém mais simples e portátil, também chamado de Mini-MERLIN) e com o Nível e Mira (com intervalos de espaçamento de 0,25 e 0,50 m).

De acordo com a análise de Morrow *et al.* (2006), os inclinômetros estacionários são relativamente caros e trabalhosos, além de serem altamente sensíveis à maneira como são operados. O *Walking Profilometer* é mais rápido e fácil de operar, porém mais caro e de precisão similar ao *Dipstick*, por exemplo. O MERLIN, equipamento de classe 3, obteve ótimo desempenho e é fácil de utilizar, mas não apresenta a mesma portabilidade do *Riley*. O método de Nível e Mira, por sua vez, é uma técnica cara e trabalhosa, principalmente em países desenvolvidos. Concluíram que cada equipamento apresenta certas vantagens sobre seus concorrentes e a escolha entre essas ferramentas depende do critério do engenheiro, já que a irregularidade relativa entre os pavimentos medidos se mantém para todos os equipamentos.

2.3 SMARTPHONES COMO ALTERNATIVA NA AVALIAÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DOS PAVIMENTOS

Os avanços na tecnologia móvel levaram ao desenvolvimento dos smartphones, uma nova classe de aparelhos móveis com funcionalidades mais avançadas de conectividade, que rapidamente se tornaram uma presença constante em nossas vidas. Boa parte dos smartphones está equipada com capacidade de processamento relativamente avançada, um sistema de posicionamento global (GPS) e sensores de movimento (acelerômetro, magnetômetro e barômetro) (DEL ROSARIO *et al.*, 2015).

A tecnologia embutida nesses aparelhos portáteis possibilitou sua utilização em diversos campos de pesquisa. Na área de transportes, surgiram aplicativos que fornecem informações em tempo real sobre a condição das vias, como é o caso do *Waze*, um dos maiores aplicativos de trânsito e navegação do mundo, baseado na interatividade dos usuários, e do *StreetBump*, aplicativo desenvolvido pelo público para mapear buracos e outras deformações nas ruas de Boston, capital de Massachusetts. Neste caso, os dados coletados a partir do acelerômetro e GPS são enviados a um servidor administrado pelo departamento de obras públicas de Boston.

Outras pesquisas também foram realizadas com o intuito de localizar panelas e outros defeitos em pavimentos urbanos (TAI *et al.*, 2010; STRAZDINS *et al.*, 2011; ASTARITA *et al.*, 2012). Recentemente, alguns pesquisadores têm estudado o uso de smartphones para avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos, devido principalmente ao seu baixo custo, fácil operação e alta produtividade (HANSON e CAMERON, 2012; FORSLOF, 2013; DOUANGPHACHANH e ONEYAMA, 2014; ALESSANDRONI *et al.*, 2014; BUTTLAR e ISLAM, 2014; HANSON *et al.*, 2014).

A utilização de smartphones para avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos pode ser vista como um sistema de medição do tipo resposta. Apesar de não funcionar como um medidor convencional da classe, que acumula os deslocamentos entre a carroceria e o eixo traseiro do veículo em um único sentido, também não medem diretamente o perfil do pavimento como um perfilômetro, mas acelerações verticais com um smartphone fixado internamente ao veículo. Esses sinais têm correlação com o IRI, que por sua vez é altamente relacionado à avaliação funcional de pavimentos. Como citam Sayers e Karamihas (1998), a obtenção de sinais de aceleração com conteúdo de frequência semelhante às acelerações do chassi de um automóvel tem alta relação com as vibrações sentidas durante a condução do mesmo.

Assim, como nos equipamentos do tipo resposta, os sinais obtidos são muito sensíveis à velocidade com que o veículo trafega e, por esse motivo, precisam de uma calibração, chamada de calibração por correlação, com o objetivo de determinar, para cada velocidade operacional, a relação entre o valor do índice de irregularidade de referência e a quantidade de deslocamentos verticais por deslocamentos horizontais (distância percorrida) medidos pelo equipamento.

No processo de calibração dos medidores do tipo resposta, os deslocamentos não podem ser comparados diretamente com um medidor estático, como no método de Nível e Mira. Isso porque os valores coletados por aquele dispositivo não medem o perfil real do pavimento, mas uma resposta em termos de deslocamentos que se relacionam com a irregularidade dos pavimentos, filtrada pelas características do veículo utilizado e que não inclui os maiores comprimentos de onda, como nos levantamentos estáticos.

Assim, reconhece-se que esta abordagem não produz um perfil verdadeiro da superfície do pavimento, mas sim, um “perfil percebido”, já que a resposta é variável de acordo com os efeitos dinâmicos decorrentes do sistema de suspensão do veículo. A análise dos efeitos da suspensão sobre os dados coletados pelos smartphones está fora do escopo desta pesquisa, assim como de

outros estudos. Alguns ainda estão sendo desenvolvidos, como de Buttlar e Islam (2014), que pretendem incorporar esses fatores na avaliação da irregularidade com smartphones.

A utilização dos smartphones para avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos é baseada na utilização do sensor de movimento, também conhecido como acelerômetro, e um GPS, ambos já presentes nos aparelhos móveis. Assim, é possível captar os sinais de aceleração vertical decorrentes das irregularidades dos pavimentos, juntamente com a velocidade e posição dos dados coletados, respectivamente. A avaliação da irregularidade por smartphones pode trabalhar com duas abordagens distintas: 1) utilização dos dados brutos (acelerações) e 2) transformação em deslocamentos após tratamento dos sinais. Nesse último caso, os deslocamentos são utilizados para cálculo dos índices de irregularidade como o IRI.

Em geral, as pesquisas têm atingido resultados satisfatórios, com correlação positiva com os índices de irregularidade obtidos por outros equipamentos, como os perfilômetros inerciais a laser (FORSLÖF, 2013; HANSON *et al.*, 2014) e equipamentos do tipo VIMS - *Vehicular Intelligent Systems* - Sistemas Veiculares Inteligentes (DOUANGPHACHANH e ONEYAMA, 2013), com coeficientes de determinação (R^2) em torno de 0,7 em alguns casos. Com isso, mostram potencial para gerar informações importantes sobre a irregularidade, com nível de qualidade aceitável para um SGP em nível de rede (SCHLOTJES *et al.*, 2014).

Quando se fala em gerência de pavimentos em nível de rede, trabalha-se com a coleta de informações agregadas referentes a toda malha viária, que são direcionadas, sobretudo, para tomada de decisões administrativas, como planejamento, programação e orçamento, que incluem: 1) identificar projetos candidatos à intervenções; priorizar projetos de acordo com as características de desempenho, tráfego, custo aos usuários, entre outros fatores locais; 2) informar as carências da agência a curto e longo prazo; 3) auxiliar na análise das estratégias de intervenção, com a verificação da atual situação do sistema e previsão de sua futura condição, de acordo com os recursos aplicados em cada alternativa (FERNANDES JR *et al.*, 2011).

Nesse sentido, devem-se adequar os diferentes equipamentos de mensuração da irregularidade de pavimentos de acordo com o tipo de informação requerida, além do tempo e meios disponíveis. Como explicam Haas *et al.* (1994), devido à forma como os dados de irregularidade são utilizados em nível de rede, as informações não precisam de alta precisão. Explicam que os levantamentos em nível de rede são usados para avaliação das necessidades globais e para fins

de programação dos investimentos de reabilitação. Consequentemente, a alta velocidade e baixo custo dos sistemas medidores do tipo resposta são adequados para essa tarefa.

Forslof (2013) comenta que o ceticismo em torno de um medidor de classe 3 (medidores do tipo resposta), como no caso dos smartphones, é natural, quando comparado com os das classes 1 ou 2 (perfilômetros). Entretanto, ressalta que os smartphones podem fornecer atualizações sobre a condição de irregularidade do pavimento a uma página da web em um curto espaço de tempo, em relação a outros métodos que obtém dados “exatos”, mas que, devido ao custo, é utilizado com pouca frequência. Na prática, uma ferramenta não impede o uso de outra. É justamente a complementação desses sistemas que permite a geração de informações significativas para a análise de desempenho dos pavimentos.

Nessa perspectiva, deve-se considerar qual a finalidade da análise dos dados de um perfil. O fato de coletar um índice que pode ser obtido repetidamente, com precisão, não fará com que seja necessariamente útil. A relevância de uma medida está associada às propriedades do pavimento que são consideradas relevantes para sua análise (SAYERS e KARAMIHAS, 1998). Os órgãos rodoviários não devem se prender apenas em cumprir a determinação das normas, no que diz respeito à frequência de coleta e limites máximos que o índice de irregularidade pode atingir em cada caso, mas sim às previsões de desempenho do pavimento.

No entanto, para estimar a condição dos pavimentos e traçar as melhores estratégias das atividades de manutenção e reabilitação, é preciso que o SGP seja baseado em dados atualizados. Quanto maior o intervalo na coleta dos dados, mais difícil é a identificação de defeitos que evoluem rapidamente pela contribuição da própria irregularidade longitudinal dos pavimentos. A realimentação contínua do índice de irregularidade em um sistema de gerência de pavimentos proporciona o cálculo dos prejuízos causados aos usuários, principalmente em termos de custos operacionais dos veículos, sendo mais um fator a ser considerado na tomada de decisão em uma determinada rede de pavimentos, ou seja, na seleção da estratégia ótima.

O uso de smartphones também pode ser aplicado para avaliar a condição de estradas não pavimentadas, nas quais se recomenda o uso de medidores de irregularidade do tipo resposta, e também podem contribuir com informações sobre defeitos dessas vias para alimentar um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Os resultados podem ser utilizados como critério na seleção das estratégias de conservação nesse tipo de via, que é muito comum em países em desenvolvimento. No Brasil, por exemplo, 78,6% da malha rodoviária é formada por rodovias

não pavimentadas (CNT, 2015). Essa parcela tem importante papel social e estratégico, pois fornecem um nível mínimo de acesso a recursos e oportunidades, além de servirem como rotas em casos de eventos de desastres ou conflitos (NAMUR e SOLMINIHAC, 2009).

Douangphachanh e Oneyama (2013) também reforçam a importância do uso de smartphones para avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos em países em desenvolvimento, onde o orçamento e a infraestrutura são limitados. Segundo os autores, devido ao custo das abordagens de alta tecnologia, muitos órgãos rodoviários coletam informações com pouca frequência. Os pesquisadores explicam que a atualização das informações regularmente, por meio da exploração dos smartphones, pode ser de grande ajuda para a avaliação da condição das estradas administradas por agências com um orçamento limitado até para as manutenções.

Buttler e Islam (2014) comentam que, com as dimensões das redes viárias, o aumento do volume de tráfego e deficiências nos gastos com transportes, o tempo e a necessidade de priorização das avaliações e manutenções dos pavimentos estão críticos. Por isso, enfatizam os custos de milhões de dólares anuais das agências estatais para a coleta de informações sobre a irregularidade das estradas, dada sua importância para a gerência de pavimentos, e defendem que o uso de smartphones poderia não só significar economia, mas também facilitar a coleta dos dados em tempo real.

Um exemplo do que essa abordagem pode oferecer é dado no trabalho de Forslof (2013), que tem desenvolvido e aprimorado continuamente um aplicativo de smartphone para avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos. O autor grava com dados a cada segundo, ou seja, utiliza uma frequência de amostragem de 100 Hz. Para obter uma visão geral em uma escala maior, o pesquisador aplica os dados em um SIG, por meio do uso do *OpenStreetMap* (OSM), como mostra a Figura 16. Desse modo, é possível obter o índice de irregularidade médio para uma região da estrada, de acordo com a área do mapa selecionada pelo usuário. Além disso, dependendo do banco de dados disponível, é possível refinar os dados e adicionar informações como largura das faixas do pavimento, volumes de tráfego etc.

Belzowski e Ekstrom (2015), em continuação dos estudos realizados desde 2012 no Instituto de Pesquisas de Transportes da Universidade de Michigan (UMTRI – *University of Michigan: Transportation Research Institute*), verificaram que os smartphones ter maior utilidade se aplicados na previsão das categorias de classificação da irregularidade dos pavimentos, em vez de estimar valores exatos de IRI, pois existem diferenças entre os modelos de smartphones e veículos. No entanto, diferente de Forslof (2013), que classificou a condição das estradas em

quatro categorias, os autores sugerem o uso de três ou cinco categorias. Esta última abordagem é mais adequada, pois permite a definição de um nível de classificação intermediário.

Figura 16 – Exemplo da aplicação de um smartphone para avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos em um SIG (Adaptada de FORSLOF, 2013)

Uma sensibilidade maior para captar as alterações nos pavimentos causadas por fatores climáticos (mudanças das estações, períodos chuvosos etc.) e/ou de volume de tráfego, permite a elaboração de propostas de gerência mais efetivas, como restrições para veículos pesados. Além disso, uma alternativa de baixo custo e alta produtividade pode incentivar departamentos com baixo orçamento a alcançarem objetivos práticos de medidas de desempenho dos pavimentos, não só com o estabelecimento de estratégias de seleção dos segmentos prioritários, como também na melhor escolha para corrigir falhas construtivas por parte dos empreiteiros, com melhoria significativa da qualidade do trabalho (HANSON *et al.*, 2014).

Além da contínua evolução dos smartphones, o aumento do número de usuários desses dispositivos também cresce rapidamente. Segundo dados publicados em fevereiro de 2016, pela *Visual Networking Index (VNI) Global Mobile Data Traffic Forecast*, que trabalha com o tráfego de dados móveis, em 2020 haverá 5,5 bilhões de usuários de dispositivos móveis no mundo, número que representa 70% da população global. Para Douangphachanh e Oneyama (2013), o grande número de usuários aumenta significativamente o potencial de coleta de uma grande quantidade de dados com baixos investimentos. Além disso, a abordagem também pode

ser útil não só para o monitoramento contínuo da irregularidade longitudinal dos pavimentos, mas da infraestrutura rodoviária como um todo.

Uma tentativa de fornecer um sistema de aquisição de dados ao público poderia ser feita com a divulgação de um aplicativo ao público em geral, por meio de lojas virtuais de aplicativos para smartphones, e proporcionar a montagem e/ou hardware necessário, com instruções de uso. Os desafios associados a este método de distribuição incluem a variação dos resultados gerados por diferentes modelos de smartphones, veículos e formas de conduzir o veículo. Também deve ser levado em consideração a possível falta de interesse de participação pelos usuários, instalação incorreta e interação limitada com os condutores dos veículos. Medidas de incentivo, como a redução das taxas do registro de veículos ou dos impostos para os participantes, poderiam ser eficazes (SAUERWEIN e SMITH, 2011).

Com abordagem similar, Douangphachanh e Oneyama (2013) pretendem utilizar técnicas simples para utilizar smartphones na estimativa da condição das estradas em termos de irregularidade. Ainda estão na fase de estudo da relação entre os sinais de aceleração fornecidos pelos smartphones e a real condição de irregularidade das estradas obtida com dados medidos por diferentes veículos, velocidades de coleta e modelos de smartphones. Ao fim dessa investigação, esperam ser capazes de estimar a condição das rodovias continuamente a partir de dados enviados pelos usuários, que seriam disponibilizados para um SGP, com o objetivo de colaborar com a programação das atividades de planejamento de manutenção dos pavimentos, com foco na rápida atualização dos dados. A Figura 17 ilustra a ideia dos autores.

Figura 17 – Imagem conceitual de um sistema de monitoramento contínuo da estrada (Adaptada de DOUANGPHACHANH E ONEYAMA, 2013)

Alessandroni *et al.* (2014) desenvolveram um aplicativo para estimar a qualidade de rolamento de pavimentos. A condição das estradas é dada por um parâmetro de irregularidade calculado por meio de algoritmos baseados em técnicas de processamento de sinais. Após serem computados, os índices de irregularidade são transmitidos e armazenados em um SIG, que permite o processamento de trechos agregados e melhor visualização da condição da rede rodoviária. Comentam que o parâmetro calculado é dependente do tipo do veículo utilizado, do modelo do aparelho e da maneira de conduzir o automóvel, mas explicam que os dados fornecidos por diferentes veículos, dispositivos móveis e condutores podem ser combinados para fornecer um índice que reflita a qualidade das estradas.

Sauerwein e Smith (2011) citam que as principais desvantagens da coleta de dados pelos usuários por meio de um sistema colaborativo incluem: a necessidade de obter uma saída de dados que requer estudos adicionais antes de se mostrarem úteis, a falta de incentivo dos proprietários dos veículos privados para operar aplicativos e a cobertura inconsistente do sistema. Apesar de ainda não se ter alcançado uma forma de aplicar esse sistema, os autores comentam que sistemas de mensuração da irregularidade de pavimentos baseados nesses aparelhos podem contar com uma grande margem de crescimento em um mercado em expansão, além do baixo custo para os usuários que venham a estar envolvidos nesse processo.

Em síntese, os smartphones, assim como outros aparelhos móveis, evoluíram nos últimos anos e passaram a representar uma opção para ajudar a solucionar problemas em diversas áreas. No campo da infraestrutura de transportes não é diferente. Como cita o Manual de Gerência de Pavimentos do DNIT (2011), é fundamental a busca por ferramentas alternativas que se apliquem a um SGP em nível de rede, nos quais as informações essenciais devem ser mais simples e levar em conta uma frequência maior para sua coleta. Tais dados podem auxiliar na seleção da melhor estratégia (“o que fazer”), na escolha dos trechos prioritários (“onde fazer”) e definição do momento adequado para a execução dos serviços de Manutenção e/ou Restauração (M&R) (“quando fazer”) em função do seu custo estimado.

2.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS FORNECIDOS POR SMARTPHONES

A irregularidade longitudinal dos pavimentos leva a acelerações verticais dos veículos em movimento. A magnitude da aceleração depende da severidade, extensão, frequência de ocorrência e tipo dos defeitos no pavimento, da existência de outras irregularidades na

superfície, das características da suspensão do veículo e da sua velocidade. Com um sensor de movimento (acelerômetro) pré-instalado, um smartphone pode ser fixado de alguma forma ao corpo do veículo e, assim, medir essas vibrações.

Esse avanço foi possível devido à redução das dimensões dos acelerômetros e outros sensores, em razão do desenvolvimento dos MEMS - *Micro-Electro-Mechanical Systems* (Sistemas Micro-Eleto-Mecânicos). Esses dispositivos viabilizaram diversas aplicações aos usuários, devido à instalação de vários componentes eletrônicos comuns em smartphones: acelerômetros triaxiais, giroscópios triaxiais, sensores de pressão barométrica e magnetômetros triaxiais (DEL ROSARIO *et al.*, 2015).

Os mecanismos mais importantes utilizados na fabricação de acelerômetros em geral são: piezoresistividade, piezoeletricidade, capacitância variável, ótica e técnicas de ressonância. Os acelerômetros instalados nos smartphones são do tipo capacitivos. As estruturas físicas dos sensores capacitivos são relativamente simples, com uma técnica que fornece uma maneira precisa de detectar o movimento do objeto. Essencialmente, os dispositivos compreendem um conjunto de um ou mais eletrodos fixos e um ou mais eletrodos móveis. Eles são geralmente caracterizados pela não linearidade, inerente ao sistema, e por não apresentarem sensibilidade à temperatura (BEEBY *et al.*, 2004).

A Figura 18 mostra a estrutura básica desses dispositivos, formada por um chip de acelerômetro composto de vários pares de eletrodos fixos e uma massa sísmica móvel. As distâncias d_1 e d_2 representam os pequenos espaços que variam devido à aceleração, formando um par de capacitores diferenciais. O chip mede as acelerações de acordo com os valores desses pares de capacitores. É a falta de precisão nesta estrutura eletromecânica que introduz diferenças sutis entre os chips dos acelerômetros instalados em diferentes equipamentos. Mesmo pequenas brechas entre as partes estruturais (introduzidas durante o processo de fabricação) podem mudar a capacitância medida.

Por meio desses artefatos, os smartphones passaram a ser aplicados em diversas áreas. No caso da avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos, tema desta pesquisa, um dos desafios na obtenção do índice de irregularidade por meio de acelerações verticais é a variação na velocidade do veículo. A frequência dos desvios verticais muda de acordo com a velocidade, assim como os valores de pico das acelerações. A diferença entre a variação da frequência e os

picos de aceleração devem ser compensados para fornecer uma estimativa significativa da irregularidade para uma ampla faixa de velocidades (SAUERWEIN e SMITH, 2011).

Figura 18 – Estrutura de um acelerômetro instalado em smartphones (Adaptada de DEY, 2014)

Além da variação dos resultados em diferentes velocidades, os sinais de aceleração estão sujeitos a ruídos, erros aleatórios originados pelo próprio acelerômetro ou outros dispositivos eletrônicos, que interferem no sinal de saída como a temperatura ou outros efeitos físicos (SILVA *et al.* 2015), deslocamento dos eixos de aceleração e a outros erros decorrentes da coleta dos dados. Os ruídos podem ser gerados, por exemplo, por movimentos ressonantes do suporte veicular para smartphone, pelo ronco do motor, na troca de marchas, em freadas, curvas horizontais e verticais ou erros aleatórios de pequena magnitude nos sinais de aceleração gerados pelo próprio acelerômetro.

No caso dos acelerômetros instalados em smartphones, as acelerações são medidas por um sistema de coordenadas definido em relação à tela do aparelho. Os eixos não são trocados quando a orientação da tela do dispositivo muda. O eixo X é horizontal e aponta para a direita, o eixo Y é vertical e aponta para cima e o eixo Z está direcionado para o exterior da face frontal da tela. Neste sistema, as coordenadas atrás da tela terão valores do eixo Z negativos, como mostra a Figura 19.

Figura 19 - Sistema de coordenadas de um smartphone

Existem vários aplicativos que registram as acelerações dos MEMs, usados para controlar a orientação da tela em smartphones. Nos levantamentos de campo deste estudo, utilizou-se o aplicativo *AndroSensor* (Figura 20), por ser um software muito utilizado (mais de um milhão de instalações), gratuito e capaz de coletar coordenadas (latitude, longitude) e acelerações simultaneamente.

Figura 20 - Detalhe do registro das acelerações pelo aplicativo *AndroSensor*

No entanto, não basta ter um aplicativo e um smartphone que funcionem adequadamente. Também é importante o cuidado na fixação do aparelho, pois o mesmo pode estar sujeito a “flutuação”, se o suporte não estiver montado de forma rígida ao para-brisa ou painel do veículo. Ao ser suspenso, devido à flexibilidade do suporte de plástico (principalmente nas montagens em balanço) ou presença de rótulas, são geradas vibrações ressonantes e, assim, o aparelho

perde a fidelidade na leitura dos movimentos do corpo do veículo (BELZOWSKI e EKSTROM, 2015).

Outro aspecto a ser considerado quando se usa um smartphone para avaliar a condição dos pavimentos, é o fato de que o GPS requer um ambiente aberto para alcançar melhor intensidade de sinais por satélites. Por esse motivo, a presença de vegetação alta nas faixas de domínio das rodovias pode interferir ou até inviabilizar a coleta de dados. Em uso similar, Eriksson *et al.* (2008) testaram a precisão do GPS de smartphones para analisar quão confiável eram os aparelhos na localização de buracos nos pavimentos e observaram um desvio padrão de 3,3 metros entre as posições informadas.

Uma vez realizada a coleta dos sinais de aceleração, assim como sua localização, por meio das coordenadas fornecidas pelo GPS, os dados podem ser correlacionados com a irregularidade longitudinal dos pavimentos. Os dados podem ser utilizados no cálculo de medidas estatísticas de RMS – *Root Mean Square* (Raiz da Média Quadrática ou Valor Eficaz) que, nesta pesquisa, serão denominadas como RMSVA – *Root Mean Square Vertical Acceleration* (Raiz da Média Quadrática da Aceleração Vertical) para enfatizar o uso dos sinais de aceleração verticais fornecidos pelos smartphones. Os dados também podem ser convertidos em deslocamentos para o cálculo de índices de irregularidade como o IRI, após passarem por um processamento. No caso dos valores de RMSVA, o cálculo é feito a partir da seguinte equação:

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

Onde:

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

a_z : Aceleração Vertical (m/s²);

n: número de dados.

Os valores de RMSVA começaram a ser utilizados na mensuração da irregularidade longitudinal dos pavimentos no final da década de 1970, quando W. R. Hudson e outros pesquisadores realizaram vários estudos baseados em equações de calibração de sistemas medidores do tipo resposta e índices de irregularidade dados por essas medidas estatísticas. Segundo Queiroz (1981), essa medida estatística era utilizada no cálculo da diferença média quadrática entre inclinações de perfis adjacentes, em que cada inclinação é dada pela relação

de mudança de elevação pelo intervalo de distância horizontal correspondente. Esta distância horizontal é o comprimento da base, que pode ter diferentes valores.

Esse comprimento de base era o maior obstáculo do uso da estatística RMSVA, já que o índice variava de acordo com o intervalo de amostragem utilizado. Consequentemente, um perfilômetro não pode obter medidas válidas com esse índice, a menos que o intervalo seja padronizado. Por esse motivo, foram propostas equações que utilizavam intervalos normalizados. No Brasil, Cezar Queiroz e outros pesquisadores também desenvolveram índices de irregularidade similares para a calibração de medidores do tipo resposta, o chamado Quociente de Irregularidade (QI), aplicado na previsão da saída do perfilômetro GMR, com uma simulação eletrônica do modelo quarto-de-carro (SAYERS e KARAMIHAS, 1998).

$$QI = 8,54 + 6,17 \times RMSVA_{1,0} + 19,38 \times RMSVA_{2,5}$$

A equação de Cezar Queiroz foi obtida com bases de 1,0 e 2,5 metros de comprimento. Queiroz (1981) testou a correlação de alguns índices estatísticos com o QI. Dentre eles, o autor recomenda os valores de RMSVA para estimar o QI e uso do método de Nível e Mira para alcançar valores de referência, com intervalo de amostragem de 0,5 m. Apesar de citar que é um método trabalhoso, o autor destaca o uso do Nível e Mira para calibração de medidores do tipo resposta como o meio mais viável para a transferência geral de índices de irregularidade, principalmente para países em desenvolvimento, onde os custos sociais que envolvem o método podem ser significativamente mais baratos que os procedimentos que dependem de instrumentos importados sofisticados.

Ainda hoje valores de RMSVA são correlacionados com índices de irregularidade de referência, como nas recentes pesquisas sobre uso de aparelhos móveis para avaliação desse defeito, principalmente pela dependência do sistema de suspensão do veículo utilizado. Zeng *et al.* (2014), por exemplo, compararam os dados de aceleração transformados em valores de RMSVA capturados por dois tablets, colocados no assoalho de um veículo, com os valores de IRI obtidos por um ARAN – *Automatic Road Analyser*, um sistema capaz de medir outros defeitos por meio do uso de várias câmeras de alta resolução. Segundo os autores, os valores de RMSVA dos sinais de aceleração alcançaram repetitividade consistente a partir de aproximadamente nove viagens, indicando corretamente o nível de irregularidade dos pavimentos, com base nos resultados de correlação das acelerações verticais com os valores de IRI obtidos pelo ARAN (coeficiente de correlação de Pearson (R) de 0,71 a 0,94).

Forslof (2013), que desenvolveu um aplicativo *Android* para a avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos, chamado *Roadroid*, utilizou duas abordagens distintas, um índice de irregularidade estimado (eIRI) e outro calculado (cIRI). O eIRI foi baseado no uso das vibrações de pico e valores de RMSVA, que foram correlacionadas com as medições realizadas por um perfilômetro a laser. A correlação é feita para compensar os resultados obtidos por três tipos de veículos e para diferentes velocidades operacionais, de 20 a 100 km/h. Assim, o autor criou o que chamou de RI - *Roadroid Index*. Já o índice cIRI, calculado por meio de simulação do modelo quarto-de-carro, foi obtido para um intervalo de 60 a 80 km/h. Ao trabalhar com o cIRI, a sensibilidade do aparelho pode ser calibrada pelo operador, por meio de uma referência conhecida.

Se a opção for o cálculo de índices de irregularidade, como o IRI, é necessário processar os dados coletados. Nesse caso, o objetivo é a obtenção dos deslocamentos a partir da dupla integral das acelerações, em função do tempo, já que esses valores são utilizados no cálculo do índice. A integral trapezoidal é um dos métodos que pode ser utilizado para calcular os deslocamentos a partir de dados discretos de aceleração. Tal processo é baseado em quatro etapas principais, que consistem na decomposição do domínio em intervalos ao longo do tempo, integração aproximada de cada intervalo, soma dos resultados numéricos obtidos e cálculo da média da soma dos resultados. Com isso, é possível determinar de forma aproximada o que seria o deslocamento real do objeto (MORAES *et al.*, 2014).

No entanto, o cálculo direto da dupla integral dos sinais de aceleração, se realizada sem tratamento adequado, pode gerar erros indesejáveis nos deslocamentos obtidos. Em primeiro lugar, há o problema das condições iniciais desconhecidas, ou seja, da velocidade e posição iniciais. Há também pequenas oscilações aleatórias geradas pelos acelerômetros. Ambos podem levar a erros de integração graves se não forem corrigidos (MINH DO e CHI LE, 2013).

Além disso, podem existir “ruídos” indesejáveis acrescentados ao sinal obtido pelo acelerômetro, já que o mesmo é sensível à aceleração da gravidade, à aceleração do veículo, às acelerações centrífugas em curvas, à variação das acelerações coletadas pelos três eixos do acelerômetro devido à mudança de orientação do smartphone junto ao corpo do veículo e às vibrações geradas pelo motor. Essas contribuições podem ter uma magnitude significativa e mascarar os sinais relacionados à irregularidade do pavimento (ALESSANDRONI *et al.*, 2014).

Como explicam Sayers e Karamihas (1998), idealmente a saída dos acelerômetros deveria ser válida independentemente da velocidade do veículo. Contudo, os autores comentam que, no mundo real da eletrônica e sensores imperfeitos, o ruído gerado por esses dispositivos, presentes nos equipamentos de mensuração de irregularidade, como nos perfilômetros inerciais, somente poderão ser considerados aceitáveis caso o sinal fornecido pelo acelerômetro for significativamente maior do que o ruído. No entanto, se o sinal for do mesmo nível que o ruído, ou menor, o computador irá gerar um perfil falso, por se basear no ruído.

Por essas razões, é necessário realizar um tratamento prévio das acelerações coletadas. No campo da engenharia, os sinais são portadores de informações, tanto úteis quanto indesejadas. Assim, extrair ou melhorar as informações úteis a partir de uma mistura de informações contraditórias é a forma mais simples de se processar um sinal. De modo geral, o processamento de sinais pode ser explicado como uma operação destinada à extração, que aumenta, armazena e transmite a informação útil. A distinção entre o que é útil ou indesejável pode ser subjetiva ou não. Daí a razão pela qual o processamento de sinais tende a ser dependente da aplicação (INGLE e PROAKIS, 1997).

No caso do processamento dos sinais de aceleração fornecidos por smartphones, para cálculo de índices de irregularidade, como o IRI, uma das técnicas disponíveis, de modo a reduzir tais inconvenientes, é a aplicação de filtros passa-alta (permite a passagem de frequências acima da frequência de corte) antes e após cada integral, como mostra a sequência abaixo (SLIFKA, 2004).

1º Passo: 1º Filtro passa-alta, para remover desvios do acelerômetro;

2º Passo: Primeira integral sobre os valores de aceleração para obtenção da velocidade;

3º Passo: 2º Filtro passa-alta, para remover componentes DC (amplitude média) do sinal de velocidade e eliminar a necessidade de um valor inicial de velocidade;

4º Passo: Segunda integral sobre os valores de velocidade para obtenção dos deslocamentos;

5º Passo: 3º Filtro passa-alta, para remover sinais de baixa frequência a partir dos deslocamentos obtidos, a fim de eliminar a necessidade de uma medida de posição inicial.

O processo é ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Diagrama do processamento dos sinais de aceleração para obtenção dos deslocamentos (Adaptada de Slifka, 2004)

Nesse processo, também é preciso considerar a escolha do filtro. Alguns podem causar atrasos consideráveis durante a filtragem dos sinais, devido à ordem do filtro, ou distorções decorrentes de respostas não lineares características do filtro utilizado. Esse efeito pode ser representado em termos de amostras ou em unidades de tempo (SLIFKA, 2004).

A filtragem pela Transformada Rápida de Fourier – FFT (*Fast Fourier Transform*) é um dos métodos indicados para analisar sinais no domínio da frequência. A representação de um sinal no domínio do tempo está naturalmente presente no nosso dia a dia. Entretanto, algumas aplicações, principalmente na engenharia, tornam-se muito mais simples e elucidativas quando visualizadas no domínio da frequência, domínio este alcançado pelas Transformadas de Fourier (NETO, 1999). Comumente são utilizadas técnicas computacionais para trabalhar com a forma discreta da Transformada de Fourier – DFT (*Discrete Fourier Transform*), por meio de algoritmos rápidos, chamados coletivamente de FFT (INGLE e PROAKIS, 1997).

De maneira geral, pode-se dizer que a Transformada de Fourier é uma saída matemática pela qual é possível calcular as amplitudes de ondas senoidais que podem ser adicionados em conjunto para construir um perfil. Nos estudos de irregularidade longitudinal dos pavimentos, a Transformada de Fourier pode ser aplicada de modo a revelar a forma como a variação do perfil se distribui ao longo de um conjunto de senoides. Quando trabalhado desta forma, a transformação é chamada de função de Densidade Espectral de Potência – PSD (*Power Spectral Density*) (SAYERS e KARAMIHAS, 1998).

Por outro lado, a Transformada de Fourier também pode ser útil para a filtragem de sinais. Recentemente Hanson *et al.* (2014) trabalharam com o software chamado DATS Toolbox da empresa Prosig e utilizaram uma FFT justamente para tratar os dados de aceleração obtidos por smartphones no cálculo dos deslocamentos verticais, para obtenção do IRI. No entanto, assim como outros autores que também trabalharam com a transformação de sinais de aceleração

fornecidos por smartphones para cálculo do IRI (FORSLOF, 2013; BUTTLAR e ISLAM, 2014), não comentaram detalhes sobre o processamento. No caso de Hanson *et al.* (2014), os autores apenas citam que o procedimento era necessário para evitar erros de integração devido aos componentes DC presentes nos sinais de aceleração fornecidos pelos smartphones, além de informar sobre os dados de entrada necessários para que o software realizasse os cálculos.

Ribeiro *et al.* (2003) também trabalharam com a FFT para obtenção de deslocamentos por meio dos dados medidos por acelerômetros, no qual sugeriram a frequência de corte de 0,7 Hz. Entretanto, Slifka (2004) explica que, quando se trata da aplicação de um sensor instalado em veículos, tal valor seria muito baixo para superar os problemas de desvio do acelerômetro e falta de condições iniciais (velocidade e posição inicial desconhecidas), sugerindo o aumento na frequência de corte para reduzir a influência dos sinais de baixa frequência próximos ao DC, que não são relacionados às vibrações do veículo.

Em resumo, é possível utilizar duas abordagens distintas para relacionar os dados fornecidos pelos smartphones com a irregularidade longitudinal dos pavimentos. É possível sintetizar o processo de obtenção dos valores de RMSVA em três passos:

- 1) fixar o smartphone com um suporte que reduza ao máximo as oscilações decorrentes de outros fatores não relacionados ao movimento do corpo do veículo e em uma posição na qual um dos três eixos do acelerômetro esteja voltado o mais perpendicularmente possível ao eixo longitudinal do automóvel;
- 2) coletar os sinais de aceleração e localização, medidos pelo sensor de movimento e GPS do smartphone, respectivamente. Isso pode ser feito com o desenvolvimento ou uso de aplicativos disponíveis para cada tipo de smartphone, de acordo com a plataforma na qual foi concebido (*Android, Windows Phone, iOS* etc.);
- 3) segmentar os dados de acordo com a subdivisão dos trechos de interesse e calcular os valores de RMSVA.

Já para o cálculo direto de índices de irregularidade, como o IRI, é necessário seguir, além dos passos 1 e 2 citados anteriormente, outros dois passos:

- 3) filtragem e cálculo da dupla integral dos dados de aceleração em função do tempo, para obtenção dos desvios verticais gerados a partir da resposta do veículo ao perfil do pavimento;

4) cálculo do índice de irregularidade longitudinal por meio de algoritmos conhecidos.

Algumas pesquisas estão em fase de análise da obtenção do IRI por meio do processamento dos dados fornecidos por smartphones. No entanto, cabe lembrar que essa aplicação não pode ser utilizada como a de um perfilômetro. Apesar de alguns estudos compararem os valores obtidos com os de perfilômetros inerciais a laser (BUTTLAR e ISLAM, 2014; HANSON *et al.*, 2014) e terem encontrado valores semelhantes, os perfis medidos não apresentavam altos níveis de irregularidade, havendo evidências de que os valores obtidos podem não ter a mesma correspondência para diferentes pavimentos com diferentes características de irregularidade, pois são sistemas de coleta distintos.

Os perfilômetros, como o próprio nome diz, buscam medir diretamente o perfil do pavimento, enquanto os medidores do tipo resposta associam suas medidas à irregularidade dos pavimentos de forma indireta, por meio de correlações com os próprios perfilômetros. Mesmo assim, o cálculo do IRI a partir dos dados fornecidos por smartphones pode ser explorado como ponto de partida para estudos que pretendam aplicar uma modelagem dos veículos utilizados ou mesmo contar com o auxílio de outros componentes (sensores de distância a laser, infravermelho ou ultrassom) que permitam chegar ao perfil dos pavimentos.

3 MÉTODO

Neste capítulo são descritos os procedimentos para obtenção dos índices de irregularidade de referência nos trechos de pavimentos selecionados para esta pesquisa, coleta dos dados relacionados à irregularidade longitudinal dos pavimentos por meio de um smartphone, investigação do funcionamento dos acelerômetros pré-instalados nesses aparelhos e análise da influência das características de irregularidade dos perfis coletados. Por fim, é exposto um breve resumo do método adotado.

3.1 OBTENÇÃO DOS ÍNDICES DE IRREGULARIDADE DE REFERÊNCIA

Para analisar o potencial de smartphones para avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos, foram calculados índices de irregularidade de referência, em termos de IRI, por meio de dados levantados pelo método de Nível e Mira (DNER-ES 173/86), para que servissem como base comparativa aos valores de RMSVA calculados a partir dos dados obtidos com um smartphone.

Foram selecionados trechos de estradas com 500 metros de comprimento, que não apresentavam curvas ou rampas acentuadas, de modo a reduzir a influência dessas variáveis nos resultados da pesquisa. Optou-se pela coleta em três segmentos, para que fossem contemplados 3 níveis de irregularidade distintos: um perfil pouco irregular (IRI com cerca de 2 m/km), um intermediário e outro muito irregular (IRI acima de 4 m/km). Desse modo, foi possível abranger uma faixa suficiente de dados, que serviram de base para a análise de consistência dos resultados alcançados com o smartphone.

A extensão de 500 metros foi escolhida para permitir a obtenção de um número razoável de amostras, já que os índices de irregularidade foram calculados a partir da subdivisão dos trechos em 100 metros de comprimento. Existem duas razões para essa distribuição:

- 1) Em geral, para a avaliação da condição de pavimentos rodoviários em sistemas de gerência de pavimentos, considera-se conveniente a segmentação das vias em seções de 100 metros ou mais;

2) A redução do comprimento desses segmentos poderia aumentar os erros durante o cruzamento dos dados obtidos pelo smartphone com aqueles medidos pelo método de Nível e Mira.

Para definir os trechos, foram realizados testes nas ruas da cidade de São Carlos - SP, com uso de um veículo e alguns modelos de smartphone. Ao passar sobre os trechos que pudessem servir à pesquisa, foram analisados:

- 1) A sensibilidade do motorista e passageiro com relação às vibrações do veículo;
- 2) A existência de espaço suficiente para acelerar e desacelerar o veículo durante a coleta de dados;
- 3) A captura de número suficiente de satélites (no mínimo 4) pelo GPS do smartphone, que estabelece a precisão das coordenadas obtidas.

Com esse procedimento, foram escolhidos três trechos para esta pesquisa, cada um com um nível de irregularidade diferente. Para a condição de maior irregularidade, foi escolhido um segmento da Estrada Municipal Guilherme Scatena, apresentado nas Figuras 22 e 23, localizado em São Carlos - SP. O pavimento desse trecho se encontrava em péssimas condições, principalmente por ser rota de muitos caminhões carregados com brita e cana-de-açúcar, além de apresentar grande quantidade de remendos desnivelados.

Figura 22 - Vista aérea da Estrada Municipal Guilherme Scatena [Google Earth (2015)]

Figura 23 – Levantamento topográfico da Estrada Municipal Guilherme Scatena

Para a condição de baixa irregularidade, foi utilizada uma das faixas da pista do Aeroporto Bartolomeu de Gusmão, localizado em Araraquara - SP (Figura 24). O aeroporto, no período da pesquisa, recebia poucos voos, sendo mais utilizado para cursos de pilotagem, o que possibilitou a coleta de dados em uma via com boas condições de rolamento (Figura 25).

Figura 24 - Vista aérea do Aeroporto Estadual de Araraquara [Google Earth (2015)]

Figura 25 - Levantamento topográfico com Nível e Mira na pista do Aeroporto Estadual de Araraquara

Já para a condição intermediária, foi selecionada uma das vias da sede da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) Pecuária Sudeste, localizada na cidade de São Carlos – SP (Figura 26). O segmento, que recebe fluxo de máquinas, veículos e animais, apresentava uma condição intermediária entre aquela encontrada nos outros dois trechos, tanto pela aparência quanto pelos testes preliminares com a passagem do veículo pela via (Figura 27).

Figura 26 - Vista aérea da Embrapa Pecuária Sudeste [Google Earth (2016)]

Figura 27 – Levantamento topográfico do segmento da Embrapa Pecuária Sudeste

Os dados coletados com o método de Nível e Mira foram utilizados para avaliar a irregularidade longitudinal dos pavimentos nos trechos em que esse defeito foi medido. Essa análise foi realizada por meio do cálculo do IRI, pelo software ProVAL (*Profile Viewing and Analysis*). Para isso, o programa precisa dos valores das cotas acumuladas, intervalo de amostragem utilizado, de 0,5 m no caso desta pesquisa, e suas respectivas unidades de medida. O índice é obtido com a média do IRI calculado nas duas trilhas de rodas de cada segmento avaliado.

3.2 LEVANTAMENTO DA IRREGULARIDADE A PARTIR DE UM SMARTPHONE

Neste tópico, apresentam-se as condições definidas para a coleta de dados com um smartphone que pudessem ser relacionadas à irregularidade longitudinal dos pavimentos.

3.2.1 ESCOLHA DO MODELO DE SMARTPHONE

Nesta pesquisa, optou-se pelo uso do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini para as coletas de campo. A escolha se deu após testes com alguns modelos de smartphones. Certos modelos não apresentaram bom funcionamento do GPS por capturarem poucos satélites. Consequentemente, as coordenadas fornecidas são de baixa precisão e reduzem a confiabilidade na localização dos segmentos da estrada. Além disso, dentre os aparelhos que possuíam um sensor de movimento (acelerômetro), alguns apresentaram baixa taxa de aquisição das acelerações medidas pelo aplicativo *AndroSensor*, escolhido para fornecer os dados gerados pelo acelerômetro e GPS do dispositivo. A taxa de aquisição de dados varia de acordo com a capacidade de processamento de dados do smartphone.

Uma das formas de saber se o acelerômetro está funcionando adequadamente é observar se o aplicativo registra a aceleração aproximadamente igual a $9,8 \text{ m/s}^2$ para cada eixo quando o mesmo estiver em repouso e posicionado perpendicularmente a uma superfície plana. Isso indica que os eixos do acelerômetro não estão deslocados. Os aplicativos utilizam um filtro passa-alta para eliminar a influência da gravidade. Assim, caso não haja uma força externa que cause uma aceleração ao aparelho, o mesmo deve registrar 0 m/s^2 para todos os eixos.

Existem outros smartphones que são tão ou mais capazes de fornecer dados úteis para avaliar a irregularidade longitudinal dos pavimentos, como mostrado em algumas pesquisas que utilizaram outros modelos para esse fim. Apesar desta pesquisa incluir testes de vibração com

três modelos de smartphones, não foi analisada a variação entre resultados produzidos por diferentes modelos por meio de coletas de campo.

3.2.2 APLICATIVO UTILIZADO NA COLETA DE DADOS COM SMARTPHONES

O aplicativo *AndroSensor* pode capturar os sinais do GPS e de acelerômetros pré-instalados em smartphones desenvolvidos em plataforma *Android* e, assim, fornece as coordenadas (latitude e longitude) e as acelerações simultaneamente, com saída dos dados em planilhas eletrônicas. O software oferece as opções de taxa de aquisição e velocidade na atualização dos dados. Nesta pesquisa, optou-se pela maior velocidade de atualização dos dados possível e uma frequência de gravação de 100 Hz (cem dados por segundo).

A gravação das acelerações a uma taxa de 100 Hz, também escolhida por outros autores (SAUERWEIN e SMITH, 2011; FORSLOF, 2013; ALESSANDRONI *et al.*, 2014; DOUANGPHACHANH e ONEYAMA, 2014; BUTTLAR e ISLAM, 2014; BELZOWSKI e EKSTROM, 2015), se deu pelo fato de que, em geral, os dados não conseguem ser atualizados em um menor intervalo de tempo. Como já explicado, esse fator depende das características do aparelho. De acordo com Buttlar e Islam (2014) e o desenvolvedor do aplicativo *AndroSensor*, boa parte dos smartphones são limitados a uma taxa de aquisição próxima de 100 Hz.

No caso do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, utilizado neste estudo para a obtenção dos valores de RMSVA, alcançou-se uma taxa de aquisição média das acelerações entre 50 e 60 Hz. Aqui se diz frequência média porque os valores oscilam entre 50 e 100 Hz. Assim, o intervalo de amostragem vai depender da velocidade do veículo durante a coleta de dados, ou seja, quanto menor a velocidade, menor o intervalo de amostragem. Com uma velocidade de 60 km/h e uma frequência de 100 Hz, por exemplo, tem-se aproximadamente um valor de aceleração a cada 16,67 cm de estrada, com a repetição de dados.

Entretanto, como será visto à frente, após a coleta dos dados nos três trechos de pavimentos, também foram realizados testes de vibração não só com outros dois modelos de smartphones, mas também com outro aplicativo desenvolvido para a coleta dos sinais de aceleração medidos por smartphones, chamado *Accelerometer Analyser*. Os testes mostraram que a escolha do software também é um fator determinante, já que o novo aplicativo testado permitiu uma taxa de aquisição de até 200 Hz para o smartphone Samsung Galaxy S5 Mini e de 100 Hz para um smartphone Motorola Moto X Play e um Sony Xperia SP, com menor repetição de dados.

Os dados do GPS são atualizados a uma frequência aproximadamente constante de 1 Hz (um dado por segundo). Assim, quando se inicia a gravação dos dados, deve-se partir de um ponto conhecido antes do início do trecho, com o veículo parado. É preciso aguardar no mínimo um segundo após apertar a opção de início de gravação, para que o aplicativo atualize pelo menos o segundo dado de latitude e longitude, para então acelerar, até atingir a velocidade de interesse antes do ponto inicial medido pelo método Nível e Mira, e parar a gravação no último ponto, que é o fim do trecho.

Esse processo é importante pois o aplicativo grava aquilo que está registrado na tela. Desse modo, ao apertar a opção de gravação, o primeiro ponto de latitude e longitude registrados podem ter um atraso de até um segundo e, assim, ocasionar perda da referência inicial. Outro ponto importante é aguardar até que o GPS do smartphone colete satélites suficientes para ter uma precisão aceitável, de no mínimo quatro satélites. Nesta pesquisa, em geral, obteve-se uma precisão de 3 a 12 metros, de acordo com os dados fornecidos pelo aplicativo *AndroSensor*.

Esse é um aspecto a ser considerado ao utilizar um sistema baseado em smartphones, principalmente quando a estrada está coberta por vegetação alta nos taludes que acompanham a rodovia. No trecho teste da Estrada Guilherme Scatena, por exemplo, percebeu-se que um dos lados alcançava uma precisão menor das coordenadas fornecidas pelo GPS do que a faixa ao lado, provavelmente devido à vegetação estar cobrindo mais esse lado da pista, o que fez com a faixa ao lado fosse escolhida para a pesquisa.

Podem ocorrer falhas devido à precisão do GPS ou no momento de parar a gravação dos dados. Para reduzir esses erros, os comprimentos dos trechos que resultaram em uma diferença maior que 3% (acima de 515 metros ou abaixo de 485 metros) foram excluídos das análises, assim como as coletas em que a velocidade operacional variou de 5 km/h, para mais ou para menos (para a velocidade de 60 km/h, por exemplo, foram eliminadas as coletas em que a velocidade ficou acima de 65 km/h ou abaixo de 55 km/h). Para a definição desses critérios, levou-se em conta a dificuldade para a obtenção dos dados em uma velocidade constante e a ordem de grandeza dos erros sobre os resultados obtidos.

3.2.3 ESCOLHA DO SUPORTE

Outro ponto a ser considerado nesse sistema é a escolha do suporte veicular para smartphones. Em testes preliminares foram avaliados alguns modelos, como mostra a Figura 28. Percebeu-se que boa parte dos suportes, mesmo com o cuidado na fixação do aparelho, permitiam a

“flutuação” do smartphone devido à flexibilidade do material, pela presença de rótulas ou pela montagem em balanço, que podem resultar em vibrações ressonantes e, conseqüentemente, perda de fidelidade na leitura dos movimentos do corpo do veículo. Como cita Forslof (2013), poucos modelos de smartphone apresentam “bons” suportes, ou seja, adequados para esse fim.

Figura 28 - Testes com suporte veicular para smartphone fixado em para-brisa

Por esse motivo, optou-se pelo uso de um suporte antiderrapante conhecido como “tapete mágico” - *Anti Slip Car Pad*. Utilizado no painel do veículo, o material adesivo de gel sílica permite que o dispositivo seja firmemente fixado ao corpo do automóvel, como ilustra a Figura 29. Colocado em uma posição vertical ao eixo longitudinal do veículo, o aparelho foi disposto de forma a medir a aceleração no eixo Z do smartphone.

Figura 29 - Testes com suporte veicular para smartphone fixado em painel

3.2.4 MODELO DO VEÍCULO

Foi utilizado um veículo da marca Volkswagen, modelo Gol G2, motor 1.0, ano 2004. A fim de evitar que a rodagem e idade do veículo acrescentassem mais erros aleatórios sobre os dados coletados, presentes em sistemas medidores de irregularidade do tipo resposta, sua suspensão foi renovada com novo jogo de amortecedores, além de ser alinhado e balanceado antes dos testes, sendo os pneus calibrados em 30 psi antes de cada coleta. A massa do sistema também é uma variável a ser considerada. O tanque de combustível, inicialmente com volume do tanque entre 50% e 75% de sua capacidade total, variou durante as medições devido ao intervalo de tempo levado para a coleta de cada trecho. Além disso, em dois dos três segmentos as coletas ocorreram com a presença de duas pessoas dentro do veículo, motorista e passageiro, e em outro segmento, apenas com o motorista. Apesar dessa variável representar um erro sobre os resultados obtidos, assim como de outros elementos que compõem a dinâmica do veículo, não se analisou a influência desses fatores sobre os resultados obtidos.

3.2.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os dados coletados pelo acelerômetro e pelo GPS do smartphone são fornecidos pelo aplicativo *AndroSensor* em formato CSV. São gravadas somente as informações dos sensores que o usuário ativar nas configurações do aplicativo, no caso desta pesquisa, dados de aceleração, coordenadas, velocidade e tempo.

Os dados de latitude e longitude são gerados em ângulos decimais, ou em graus, minutos e segundos. Após levantar as coordenadas, utilizou-se o software ProGrid do IBGE para obter as posições em UTM - Universal Transversa de Mercator e calcular a distância euclidiana entre os pontos coletados, de acordo com a seguinte equação:

$$D(P, Q) = \sqrt{(X_p - X_q)^2 + (Y_p - Y_q)^2}$$

Em que:

D = distância entre coordenadas P e Q (m);

X_i = latitude da coordenada i (UTM);

Y_p = longitude da coordenada i (UTM).

A partir do cálculo da distância e da organização dos dados fornecidos pelo *AndroSensor* em planilhas eletrônicas, que inclui a eliminação de erros nos dados coletados (estabelecidos no item 3.2.2), passa-se para a etapa de cálculo dos valores de RMSVA.

3.2.6 TESTES DE VIBRAÇÃO COM SMARTPHONES

Para ajudar na análise dos sinais fornecidos pelo smartphone, foram realizados testes de vibração com alguns modelos desse dispositivo, com dois objetivos principais:

- 1) Avaliar o funcionamento dos acelerômetros dos smartphones, com base em um sistema com maior capacidade de aquisição de dados;
- 2) Avaliar a possibilidade do cálculo do IRI a partir dos dados de smartphones.

O conhecimento sobre o funcionamento do acelerômetro serviu como base para complementar a análise dos resultados obtidos nesta e em outras pesquisas citadas neste estudo. Os testes também são importantes para verificar se o algoritmo utilizado no cálculo dos deslocamentos verticais funcionava adequadamente.

Os testes foram realizados com o uso de um equipamento conhecido como *Shaker*, modelo 4808, da empresa BK - *Briuel & Kjaer*. O aparelho impõe oscilações verticais em frequências conhecidas, selecionadas pelo usuário, e trabalha junto a um amplificador, utilizado para variar a amplitude dos sinais gerados. Para esta pesquisa, foram escolhidas as frequências de 5, 10, 15, 20, 30, 40 e 50 Hz. A frequência máxima de 50 Hz foi selecionada após testes preliminares, nos quais se observou que o smartphone não tinha capacidade para acompanhar o acelerômetro de referência a partir desse valor. Isso já era esperado, já que, como a maior taxa de aquisição que o aparelho podia obter era de 100 Hz, a frequência máxima que poderia medir seria de 50 Hz. Como explica o teorema de Nyquist, a frequência de amostragem de um sinal analógico deve ser maior ou igual a duas vezes a largura de banda desse sinal.

Para verificar se a aceleração medida estava correta, utilizou-se um acelerômetro piezoelétrico, também da empresa BK, com taxa de aquisição de dados fixada em 500 Hz. Mais detalhes sobre os componentes utilizados podem ser consultados no Anexo A. Após montar o conjunto de equipamentos necessários à execução dos testes (Figura 30), os smartphones e o acelerômetro foram fixados em uma chapa de aço que, por sua vez, era presa ao *Shaker* por meio de um parafuso (Figura 31). Como os dois dispositivos oscilavam simultaneamente, também deveriam alcançar a mesma resposta em termos de aceleração (m/s^2).

Como citado no item 3.2.1, apesar desta pesquisa não incluir a análise da variação entre resultados produzidos por diferentes modelos de smartphones em coletas de campo, os testes de vibração foram realizados com três modelos de smartphone, dentre eles o Samsung Galaxy S5 Mini utilizado nas coletas de campo, um Motorola Moto X Play e um Sony Xperia SP. Os smartphones foram testados com duas taxas de aquisição, de 50 e 100 Hz, por serem as mais utilizadas pelos pesquisadores citados na revisão bibliográfica desta pesquisa.

Figura 30 - Conjunto de equipamentos utilizados nos testes de vibração

Figura 31 - Detalhe da fixação do acelerômetro e smartphone sobre o *Shaker*

3.2.7 ESPECTRO EM FREQUÊNCIA DOS PERFIS COLETADOS EM CAMPO

Após realizar a coleta de dados com o smartphone e verificar os efeitos da frequência de oscilação do aparelho por meio dos ensaios de vibração, foram realizados alguns testes para analisar a influência do espectro em frequência das informações coletadas em campo, ou seja, dos três perfis de pavimentos utilizados nesta pesquisa sobre os valores de RMSVA calculados a partir dos dados levantados pelo smartphone Samsung Galaxy S5 Mini.

No caso do segmento do Aeroporto Estadual de Araraquara e da Estrada Municipal Guilherme Scatena, como os testes foram realizados quatro meses após a coleta de dados realizada pelo método de Nível e Mira e smartphone, os perfis sofreram mudanças em seu nível de irregularidade. Para o trecho da Embrapa Pecuária Sudeste não ocorreu o mesmo inconveniente, já que os dados coletados com smartphone e Nível e Mira foram obtidos na mesma semana que os dados coletados para análise espectral. Mesmo assim, os trechos serviram para se atingir os objetivos deste tópico, como será visto no 4.2.2, que apresenta os resultados desta análise.

Para obter o espectro dos sinais coletados nesta pesquisa, foi utilizado um acelerômetro piezoresistivo da marca ENDEVCO, modelo 7265A-HS, de 20g de fundo de escala e seleção da taxa de aquisição de dados em 1000 Hz, por meio de um conjunto formado pela placa de aquisição da marca *National Instruments*, modelo NI-USB 6009, com 8 canais de entrada analógicos de 14 bits de sensibilidade, com capacidade para taxas de aquisição de até 48.000 amostras por segundo. Esses componentes foram conectados com filtro analógico de 100 Hz (Anexo B) e digitalizados com filtros passa-baixa *ButterWorth* de 2ª ordem em 100 Hz.

As informações referentes às propriedades deste sensor podem ser consultadas no Anexo C. O dispositivo, além de apresentar flexibilidade para coletas de campo, é capaz de responder em frequência maiores que as do smartphone e, assim, permite a coleta com maiores taxas por meio da placa de aquisição (Anexo D). Como já citado, nesta etapa foi utilizada uma taxa de aquisição de dados de 1000 Hz. Elaborou-se um software de aquisição de dados em plataforma LabVIEW e o sensor foi montado sobre a tela do smartphone, de modo que os dois medissem seus sinais na mesma direção, perpendicular ao eixo longitudinal do veículo (Figura 32).

A taxa de 1000 Hz foi escolhida após testes preliminares na Estrada Municipal Guilherme Scatena, que mostraram que a magnitude dos sinais de aceleração obtidos após a frequência de 100 Hz era insignificante. Assim, uma taxa de aquisição dez vezes maior que essa frequência

reduziria substancialmente o erro na representação dos sinais no domínio do tempo, como apontado por Endo *et al.* (2014).

Figura 32 – Sistema de aquisição dos espectros coletados em campo

3.2.8 ANÁLISE DO APLICATIVO COMO VARIÁVEL NOS RESULTADOS OBTIDOS

Após realizar os testes de vibração e a análise espectral dos perfis coletados em campo e identificar falhas nos sinais fornecidos pelos smartphones, procurou-se analisar o aplicativo *AndroSensor* como a possível causa dos erros encontrados, principalmente com relação à taxa de aquisição dos dados. Assim, foram realizados novos testes de vibração, com outro aplicativo desenvolvido para coleta de sinais de aceleração em smartphones, o *Accelerometer Analyzer*. O aplicativo permite a utilização de algumas taxas de aquisição fixas. Para esses testes foi utilizada novamente a taxa de aquisição “*Game*”, correspondente a 50 Hz, e a taxa “*Fatest*”. Nesse último caso, a taxa varia de acordo com a capacidade do smartphone. Novamente, os sinais medidos pelos smartphones foram comparados aos do acelerômetro piezoelétrico, sendo novamente selecionada a taxa de aquisição de 500 Hz. Também foram comparados os sinais medidos pelo acelerômetro piezoelétrico e acelerômetro piezoresistivo, utilizado nas coletas de campo, com a seleção da mesma taxa de aquisição do acelerômetro piezoelétrico, de 500 Hz.

Com isso, também foi possível analisar o desempenho de outro aplicativo quanto à atenuação dos picos de aceleração em oscilações de alta frequência, a representação de seus espectros no domínio da frequência e a possibilidade do cálculo adequado dos deslocamentos verticais a partir de um sinal de aceleração fornecido por um smartphone. Para tanto, foram utilizados as mesmas frequências de oscilação já selecionadas no item 4.2.1, com a inclusão das frequências

de oscilação de 75 e 100 Hz. Essas duas frequências foram adicionadas porque na análise espectral dos perfis coletados em campo não se observaram magnitudes relevantes em frequências acima de 100 Hz. Sendo assim, esta segunda etapa dos testes de vibração também serviu para estimar o desempenho dos smartphones em campo com o uso de outro aplicativo.

3.2.9 CÁLCULO DE VALORES DE RMSVA COM SMARTPHONES

Após calcular os valores de RMSVA a partir dos sinais fornecidos pelo smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, analisou-se a repetitividade desses índices por meio do cálculo do desvio padrão e do coeficiente de variação desses valores, de acordo com a velocidade operacional e o trecho medido. De maneira similar à norma ASTM E 1448/92, que indica os procedimentos para calibração de medidores do tipo resposta, utilizou-se a média dos valores de RMSVA calculados em cada cenário de coleta.

Como também recomendaram Gillespie *et al.* (1986), essa é uma forma de reduzir erros gerados nas manobras do condutor, variações na resposta do veículo e outros fatores relacionados aos medidores do tipo resposta. Essa estratégia foi utilizada em trabalhos similares, como Belzowski e Ekstrom (2015), que coletaram dados com um smartphone em 2014, a partir de um aplicativo desenvolvido desde 2012 na UMTRI. Os autores verificaram que a condução do veículo sobre o mesmo trecho de estrada, repetidas vezes, pode melhorar a previsão das classificações de irregularidade dos pavimentos em termos de IRI.

Nesta pesquisa, os valores de RMSVA foram calculados com uma média de 10 viagens, todas válidas para cada cenário de coleta, de acordo com os critérios descritos no item 3.2.2. Por fim, as amostras de RMSVA foram confrontadas com os valores de IRI calculados a partir dos dados levantados pelo Nível e Mira. Essa etapa foi realizada por meio de gráficos de dispersão entre os valores de RMSVA e IRI. As curvas e seus respectivos coeficientes de correlação têm o propósito de avaliar quão próxima é a ligação entre os dados fornecidos pelo smartphone e a irregularidade longitudinal dos pavimentos e em quais faixas de irregularidade e velocidades operacionais essa correspondência é maior.

3.3 RESUMO DO MÉTODO

A seguir são apresentadas brevemente as etapas cumpridas ao longo desta pesquisa:

a) Revisão bibliográfica sobre a irregularidade longitudinal dos pavimentos (consequências causadas por esse defeito e sua mensuração) e as recentes pesquisas relacionadas ao uso de smartphones para avaliação desse defeito;

b) Levantamento de irregularidade com o método de Nível e Mira, a fim de comparar os dados obtidos pelo smartphone com os de um instrumento de referência, utilizado para calibrar medidores de irregularidade tipo resposta (DNER-ES 173/86), como é o caso do smartphone. Para isso, foram escolhidos trechos com perfis pouco irregulares (IRI de aproximadamente 2 m/km), intermediários e muito irregulares (IRI acima de 4 m/km);

c) Obtenção de sinais de aceleração verticais medidos com um smartphone, coletados nos mesmos trechos levantados pelo Nível e Mira. Essa etapa foi realizada com um smartphone fixado ao painel de um veículo, a diferentes velocidades (de 20 a 100 km/h), para analisar a variação da correlação entre os índices calculados a partir dos dois métodos;

d) Organização dos dados em planilhas eletrônicas e eliminação dos dados que apresentaram uma diferença de comprimento dos trechos maior que 3% (15 em 500 metros) ou nos quais a variação da velocidade operacional foi superior a 5 km/h, para mais ou para menos;

e) Execução de testes de vibração com três modelos de smartphones, a fim de analisar os sinais de aceleração fornecidos pelos aparelhos e encontrar indícios sobre o funcionamento de um algoritmo utilizado para cálculo de deslocamentos verticais;

f) Análise da influência do espectro em frequência dos perfis coletados em campo sobre os índices de irregularidade calculados a partir dos dados fornecidos por um smartphone;

g) Execução de novos testes de vibração para verificar a diferença entre dois aplicativos utilizados para medir os sinais de aceleração fornecidos por smartphones;

h) Cálculo dos valores de RMSVA com os dados de aceleração vertical fornecidas pelo smartphone Samsung Galaxy S5 Mini;

i) Cálculo do IRI a partir dos dados levantados pelo Nível e Mira, por meio do software ProVAL;

j) Determinação de valores de RMSVA com uma média de 10 viagens em cada trecho;

k) Cálculo do desvio padrão e do coeficiente de variação dos valores de RMSVA, para avaliar a repetitividade desses valores para cada cenário de coleta;

l) Comparação das amostras de RMSVA com o IRI, por meio de gráficos de dispersão, a fim de analisar quão próxima é a relação entre os dados fornecidos pelo smartphone e a irregularidade longitudinal dos pavimentos medidos (coeficiente de correlação).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo é apresentada a análise e interpretação dos resultados obtidos com os dados levantados com o método de Nível e Mira e pelos smartphones, em testes de vibração e em levantamentos de campo.

4.1 RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO DE NÍVEL E MIRA

Os perfis de referência utilizados para o cálculo do IRI, para as três seções de pavimentos selecionadas, foram levantados por meio do método de Nível e Mira, como indica a norma DNER-ES 173/86. No entanto, diferentemente dos 320 metros prescritos na norma, foram utilizados três trechos com 500 metros de extensão (Estrada Municipal Guilherme Scatena, Aeroporto Estadual de Araraquara e Embrapa Pecuária Sudeste).

Em cada segmento, mediram-se as cotas das duas trilhas de rodas que, devido à escala, se sobrepõem nas Figuras 33 a 35, nas quais é possível observar uma certa declividade longitudinal, em torno de 1,0% no trecho da Estrada Municipal Guilherme Scatena, de 1,8% na seção da pista do Aeroporto Bartolomeu de Gusmão e de 2,0% na primeira metade do segmento da Embrapa Pecuária Sudeste, seguida de um aclave de 0,2%.

Figura 33 - Perfil da pista do Aeroporto Bartolomeu de Gusmão

Figura 34 - Perfil da Estrada Municipal Guilherme Scatena

Figura 35 – Perfil do trecho da Embrapa Pecuária Sudeste

Para avaliação do nível de irregularidade de cada perfil, foi calculado o IRI, que funciona como um filtro passa-banda, pelo qual a resposta é dada com um ganho menor que 0,5 para comprimentos de onda menores que 1,25 metros e maiores que 30 metros. Dessa forma, retira-se a influência da macrotextura dos revestimentos e da inclinação das rampas observadas nos perfis (Figuras 33 a 35).

O IRI de cada trecho foi calculado com o software ProVAL. Os dados de entrada são os valores das cotas acumuladas e o intervalo de amostragem (0,5 m), medidos em cada trilha de rodas, com obtenção da média das duas trilhas em cada trecho medido. Os resultados dos três perfis, com a subdivisão dos trechos em seções de 100 metros, podem ser vistos na Figura 36.

Figura 36 - Índice Internacional de Irregularidade (IRI) dos trechos experimentais

Como era de se esperar, o trecho medido na Estrada Municipal Guilherme Scatena alcançou um alto nível de irregularidade, como mostrado nos resultados de IRI da Figura 36, com valor máximo de 12,5 m/km e uma média de 9,0 m/km na extensão total dos 500 metros. Esses valores podem ser explicados pelo nível de deformação do pavimento, como ilustra a Figura 37, em razão do tráfego pesado de caminhões carregados com brita e cana de açúcar e grande número de remendos desnivelados.

Em contrapartida, na pista de pouso e decolagem do aeroporto, houve pouco desconforto durante a coleta dos dados, proporcionado por uma melhor condição de rolamento (Figura 38), que deve respeitar uma exigência maior quanto ao limite de irregularidade, tendo havido, também, menor variação entre os resultados das subdivisões de 100 metros, com maior valor de IRI registrado de 2,1 m/km e uma média de 1,9 m/km na extensão total dos 500 metros medidos.

Já o segmento da Embrapa Pecuária Sudeste (Figura 39), apesar de não ter sido construído com a mesma exigência da pista do aeroporto, não recebe as solicitações de um tráfego pesado, como aconteceu no segmento da Estrada Municipal Guilherme Scatena. Desse modo, o índice de irregularidade desse trecho apresentou valores intermediários em relação aos obtidos nos outros dois segmentos, como mostrado na Figura 36. O valor máximo calculado foi de 3,7 m/km, com uma média de 3,4 m/km na extensão total dos 500 metros.

Figura 37 – Estrada Municipal Guilherme Scatena

Figura 38 - Pista do Aeroporto Estadual de Araraquara

Figura 39 – Via da Embrapa Pecuária Sudeste

4.2 RESULTADOS OBTIDOS PELOS SMARTPHONES

Neste tópico é feita uma análise dos dados fornecidos por smartphones, por meio de testes de vibração e da análise do espectro em frequência dos perfis coletados em campo.

4.2.1 TESTES DE VIBRAÇÃO COM SMARTPHONES

Como explicado no item 3.2.6, foram realizados testes de vibração com três smartphones, a fim de investigar a qualidade dos sinais fornecidos por esses aparelhos, com base em um sensor de referência (acelerômetro piezoelétrico), bem como de analisar o algoritmo utilizado para o cálculo de deslocamentos verticais a partir dos sinais fornecidos por acelerômetros.

Os testes de vibração foram realizados por meio de um sistema composto por um amplificador e um condicionador de sinais, um excitador eletrodinâmico, conhecido como *Shaker*, e um computador que informa ao sistema o tempo e a frequência de cada vibração, por meio de um algoritmo de geração de sinais desenvolvido em MATLAB. Foram selecionadas as frequências de oscilação de 5, 10, 15, 20, 30, 40 e 50 Hz. Os resultados obtidos pelos três modelos de smartphones utilizados e para as duas taxas de aquisição investigadas (50 Hz e 100 Hz) foram confrontados com os do acelerômetro de referência. Nas Figuras 40 e 41 são apresentados um exemplo de sinal de aceleração obtido pelo smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, para a taxa de aquisição de 50 e 100 Hz, respectivamente, em relação ao sinal fornecido pelo acelerômetro

de referência, com taxa de aquisição fixada em 500 Hz, para uma dada amplitude de oscilação fornecida pelo *Shaker*.

Figura 40 - Sinal de aceleração do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini: taxa de aquisição de 50 Hz e diferentes frequências de oscilação

Figura 41 - Sinal de aceleração do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini: taxa de aquisição de 100 Hz e diferentes frequências de oscilação

Pode-se notar que, quanto maior a frequência de oscilação, maior a perda de informações, tanto na amplitude quanto no comprimento de onda dos sinais medidos. O mesmo ocorreu para os modelos Motorola Moto X Play e Sony Xperia SP, como mostram as Figuras 42 a 45, novamente com taxas de aquisição de 50 e 100 Hz e mesma amplitude de oscilação. Outras amplitudes de oscilação também foram testadas, com resultados semelhantes (Apêndice A).

Figura 42 - Sinal de aceleração do smartphone Motorola Moto X Play: taxa de aquisição de 50 Hz e diferentes frequências de oscilação

Figura 43 - Sinal de aceleração do smartphone Motorola Moto X Play: taxa de aquisição de 100 Hz e diferentes frequências de oscilação

Figura 44 – Sinal de aceleração do smartphone Sony Xperia SP: taxa de aquisição de 50 Hz e diferentes frequências de oscilação

Figura 45 - Sinal de aceleração do smartphone Sony Xperia SP: taxa de aquisição de 100 Hz e diferentes frequências de oscilação

Mesmo com a escolha de uma taxa de 100 Hz, a taxa de aquisição média do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini se manteve em torno de 58 Hz, assim como a do smartphone Motorola Moto X Play, enquanto que a do smartphone Sony Xperia SP permaneceu em cerca de 50 Hz. Esse pode ter sido o motivo para que a diferença entre os sinais fornecidos por este aparelho e o acelerômetro fosse maior quando comparados aos sinais dos outros dois modelos, o que leva a crer que as falhas tenham sido provocadas não só pela baixa taxa de aquisição de dados, também responsável pelo efeito de *aliasing*. Esse fenômeno ocorre quando a amostragem de um sinal ocorre em uma frequência menor que a taxa de Nyquist, assim, quando o sinal é convertido para o tempo contínuo acaba apresentando falhas no sinal reconstruído, que não estão presentes quando o sinal original é amostrado. Esse efeito é demonstrado na Figura 46, que apresenta um exemplo de sinal senoidal com taxa de 8 amostras/segundo (8 Hz), para representar três sinais com diferentes frequências (f_0 igual a 3, 5 e 9 Hz).

Figura 46 – Demonstração do efeito do *aliasing* no domínio do tempo [Adaptada de <http://fourier.eng.hmc.edu/e59/lectures/e59/node26.html>]

Na Figura 46, observa-se que não ocorre efeito do *aliasing* quando a taxa de amostragem é maior que o dobro da amostragem do sinal original (8 Hz), ou seja, para f_0 igual a 3 Hz. No entanto, quando a taxa de amostragem é menor que a metade da amostragem do sinal original, ou seja, para f_0 igual a 5 e 9 Hz, a falha na reconstrução do sinal original causado pelo efeito do *aliasing* é visível.

A consequência do efeito do *aliasing* no domínio do tempo também está presente no domínio da frequência, como pode ser observado na Figura 47, que mostra a representação do exemplo da Figura 46 no domínio da frequência. O *aliasing* causa a sobreposição das frequências do sinal original e, assim, as frequências se dobram em torno da metade da taxa de amostragem e é por isso que esse efeito também é conhecido como “dobra espectral” (ZAWISTOWSKI e SHAH, 2010).

Figura 47 - Demonstração do efeito do *aliasing* no domínio da frequência [Adaptada de <http://fourier.eng.hmc.edu/e59/lectures/e59/node26.html>]

No caso da avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos por smartphones, isso significa que, para estradas com características de irregularidade de alta frequência, as amplitudes dos sinais de aceleração podem ser atenuados, caso a taxa de aquisição da dados não seja suficientemente alta. As frequências das irregularidades de uma estrada dependem da velocidade utilizada e das características de superfície do pavimento, como a quantidade e comprimento de onda dos defeitos presentes no revestimento (deformações permanentes, remendos desnivelados, corrugações e panelas), assim como do próprio tipo de revestimento.

Os sinais de aceleração fornecidos pelo smartphone também não apresentaram a mesma suavidade daqueles fornecidos pelo acelerômetro de referência, devido à repetição de alguns dados. A perda de informações associada à capacidade de aquisição de dados dos smartphones está novamente ligada ao teorema de Nyquist, o qual descreve que a frequência de amostragem de um sinal analógico só poderá ser reconstruído com o mínimo de perda de informação se a taxa de aquisição for maior ou igual a duas vezes a largura de banda desse sinal.

No entanto, o uso de dois pontos para a descrição de uma senoide é um valor baixo, com grande probabilidade de erros na amplitude do sinal reconstruído. Conceitualmente, é possível zerar o erro em amplitude se a amostragem do sinal original ocorrer exatamente em seus picos, mas na prática não é uma tarefa simples e, no caso das aplicações desta pesquisa, impossível. Como

mostra a pesquisa de Endo *et al.* (2014), para reconstruir uma senoide com erro em amplitude menor que 10 % são necessárias sete amostras por período de sinal reconstruído (Tabela 1). Portanto, para reduzir as chances de erro na representação de senoides, no caso desta pesquisa dos perfis dos pavimentos filtrados pelo veículo, deve-se coletar o maior número de amostras possível em cada período.

Tabela 1 - Erro na amplitude de acordo com o número de amostras por período

Número de amostras por período	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Erro mínimo (%)	0,0	13,5	0,0	4,9	0,0	2,5	0,0	1,5	0,0
Erro máximo (%)	100	50	29,3	19,1	13,4	9,9	7,6	6	4,9

Fonte: Endo *et al.* (2014)

Os testes de vibração também serviram como base para a verificação do funcionamento do algoritmo de Slifka (2004) a fim de, por meio deste, analisar a abordagem do cálculo dos deslocamentos verticais por meio de sinais de aceleração fornecidos por smartphones, utilizados no cálculo do IRI em algumas pesquisas apresentadas na revisão bibliográfica. Para isso, utilizou-se o sinal de aceleração fornecido pelo acelerômetro piezoelétrico apresentado na Figura 41 e calculou-se seu deslocamento vertical promovido pelas vibrações do *Shaker*, por meio do algoritmo de Slifka (2004) e pela Equação 1, que é resultante da dupla derivada de um sinal senoidal de frequência fixa. Apesar dos dados fornecidos pelo acelerômetro piezoelétrico não formarem uma senoide perfeita, é um sinal obtido a partir de frequências fixas bem definidas e pode ser aplicado como entrada na Equação 1 para cumprir o objetivo desta análise.

$$d = \frac{a}{(2\pi f)^2} \times 0,001 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

d = deslocamento vertical (mm);

a = aceleração vertical (m/s²);

f = frequência de vibração (Hz).

A Figura 48 mostra o deslocamento do acelerômetro piezoelétrico obtido tanto pelo algoritmo de Slifka (2004) quanto pela Equação 1. Percebe-se que até a frequência de oscilação de 40 Hz os deslocamentos obtidos são idênticos, com exceção do primeiro décimo de segundo, devido à ocorrência de um pico na amplitude de aceleração decorrente da fase de adaptação do movimento vertical fornecido pelo *Shaker*, antes do ensaio seguir a primeira frequência de oscilação constante, igual a 5 Hz.

Figura 48 – Deslocamento do acelerômetro piezoelétrico calculado pela equação 1 e pelo algoritmo de Slifka (2004)

Por meio do algoritmo de Slifka (2004), fez-se a tentativa do cálculo do deslocamento do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini com seus dados de aceleração (Figura 41). Como o smartphone e o acelerômetro piezoelétrico se deslocaram simultaneamente, já que ambos estavam fixos ao *Shaker*, deveriam alcançar os mesmos resultados em termos de deslocamentos verticais. Um exemplo do código (adaptado) de Slifka (2004) é dado no Anexo E.

A Figura 49 mostra o deslocamento obtido para o acelerômetro piezoelétrico (Equação 1) e para o smartphone (algoritmo de Slifka, 2004). Apenas na frequência de oscilação de 5 Hz o deslocamento calculado com os dados do smartphone é semelhante ao do acelerômetro piezoelétrico, com pouca atenuação do sinal. A partir de 10 Hz os erros no cálculo do deslocamento com o sinal fornecido pelo smartphone aumentam significativamente e o resultado já não apresenta qualquer semelhança com o movimento real do aparelho.

Figura 49 - Deslocamento do acelerômetro piezoelétrico calculado pela Equação 1 e do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini calculado pelo algoritmo de Slifka (2004)

Para obter os resultados das Figuras 48 e 49, os filtros passa-alta foram utilizados com o uso de frequências de corte de 4 Hz. No entanto, o valor de corte não é fixo, pois varia de acordo com o tipo do sensor empregado (Slifka, 2004). O corte pode ser modificado mesmo com o uso de um mesmo smartphone, uma vez que esses dispositivos estão sujeitos a mudanças em sua velocidade de processamento quando executa mais de uma função durante a coleta de dados, como a busca de torres ou recepção de chamadas.

Com esses resultados, pode-se dizer que a taxa de aquisição dos sinais de aceleração pelos smartphones é um fator importante, que deve ser levado em conta na avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos a partir desse sistema. Para ter uma ideia do quanto esse fator pode limitar o uso dos smartphones para esse fim, foram realizados alguns levantamentos de campo, a fim de obter os espectros em frequência dos perfis coletados em campo. Tais análises foram feitas conforme descrito no item 3.2.8, cujos resultados serão discutidos no item 4.2.2.

4.2.2 ESPECTRO EM FREQUÊNCIA DOS PERFIS COLETADOS EM CAMPO

Por meio dos testes de vibração foi possível observar que os sinais de aceleração fornecidos pelos smartphones apresentaram falhas principalmente em oscilações de frequência acima de 20 Hz, tanto em termos de amplitude quanto de comprimento de onda dos sinais medidos. Para

analisar esse fenômeno em condições reais, foram realizadas coletas de dados em campo, com o uso de um acelerômetro piezoresistivo (referência) e o smartphone Samsung Galaxy S5 Mini.

Para isso, procurou-se uma forma de obter informações sobre a frequência dos perfis levantados anteriormente, ou seja, que já haviam sido medidos para o cálculo dos valores de RMSVA a partir de um smartphone e IRI pelo Nível e Mira, a fim de buscar mais detalhes sobre a influência do espectro desses perfis, com diferentes níveis de irregularidade, sobre os índices calculados. Além disso, essa análise também serviu para investigar algumas formas de aplicação dos dados gerados pelos smartphones. Como os testes foram realizados quatro meses após a coleta de dados nos trechos do Aeroporto Estadual de Araraquara e da Estrada Municipal Guilherme Scatena, o nível de irregularidade nessas vias apresentou maior variação.

Apesar do efeito do clima, o pavimento do Aeroporto Estadual de Araraquara sofreu pouca alteração, uma vez que a pista recebe apenas tráfego de aeronaves de pequeno porte para cursos de pilotagem, diferente do segmento da Estrada Municipal Guilherme Scatena, que visivelmente não apresentava as mesmas condições. Assim, nesse caso, os resultados obtidos nesta análise sofreram uma certa disparidade em termos de índices de irregularidade quando comparados com aqueles obtidos na primeira coleta de dados. Para o trecho da Embrapa Pecuária Sudeste não houve modificação, já que os dados coletados com o smartphone Samsung Galaxy S5 Mini e o Nível e Mira foram medidos na mesma semana que os dados coletados para análise espectral, como explicado no 3.2.7.

Para esta análise, trabalhou-se com um modelo de acelerômetro diferente daquele aplicado nos testes de vibração (acelerômetro piezoelétrico). Desta vez, foi utilizado como referência um acelerômetro piezoresistivo, que apresenta flexibilidade para as coletas de campo e cujas informações podem ser consultadas no Anexo C. O sensor foi utilizado para a obtenção de sinais de aceleração de referência, sendo montado sobre a tela do smartphone, de modo que os dois medissem seus sinais simultaneamente, ambos na direção perpendicular ao eixo longitudinal do veículo.

Os resultados obtidos permitiram deduzir alguns fatos relacionados ao uso dos sinais fornecidos pelos smartphones. Da Figura 50 a 52 são apresentados exemplos de coletas para as velocidades de 20, 40 e 60 km/h, no mesmo trecho da Estrada Municipal Guilherme Scatena, com extensão de 500 metros, com a plotagem do espectro de frequência do sinal de aceleração fornecido pelo

smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz, junto com a do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição fixada em 1000 Hz.

Os gráficos foram plotados com frequências de até 100 Hz, com aplicação de um filtro passa-baixa *Butterworth* de 2ª ordem em 100 Hz. Isso porque acima dessa frequência surgiram apenas eventos de menor magnitude, com amplitude aproximadamente constante, que estão relacionadas ao ruído produzido pelo acelerômetro piezoresistivo, que pode ser originado pela perturbação das cargas elétricas transmitidas pelos cabos e componentes do sensor ou outros fatores aleatórios (SILVA *et al.*, 2015) e se mostram presentes em toda a banda de frequência desse dispositivo. Tal sinal pode ser ignorado, pois não tem relação com a irregularidade dos pavimentos. Apesar do ruído ser um inconveniente para as análises espectrais, não apresentaram amplitudes relevantes na banda do sinal do acelerômetro de referência quando comparados com outros eventos abaixo da frequência de 100 Hz, relacionados aos perfis coletados.

De forma geral, observa-se que em algumas frequências, o espectro das acelerações obtidas pelo sensor piezoresistivo tem maior amplitude que as do sensor do smartphone, principalmente acima de 20 Hz. Já para as frequências abaixo desse valor, a amplitude dos espectros dos sinais de aceleração medidos pelo smartphone muitas vezes são maiores que as do sensor de referência. Ambas as situações ocorrem pelo uso de uma baixa taxa de amostragem, incluindo a ocorrência do efeito de *aliasing*, coerentemente aos resultados obtidos nos testes de vibração.

Figura 50 – Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 20 km/h

Figura 51 – Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 40 km/h

Figura 52 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 60 km/h

Como citado no item 3.2.6, o smartphone Samsung Galaxy S5 Mini não consegue manter a taxa de aquisição de 100 Hz constante, pois esta varia em torno de 58 Hz, o que resulta na repetição de alguns dados. Por esse motivo, foram coletados dados a 50 Hz, para investigar o espectro dos sinais de aceleração com baixa repetição de dados e analisar uma taxa que também foi utilizada por outros autores.

Assim, as Figuras 53 a 55 apresentam exemplos de coletas para as velocidades de 20, 40 e 60 km/h, no mesmo trecho com extensão de 500 metros da Estrada Municipal Guilherme Scatena, com a plotagem do espectro do sinal de aceleração fornecido pelo smartphone e com taxa de aquisição de 50 Hz, junto com a do acelerômetro de referência, com taxa de aquisição fixada em 1000 Hz.

Como o smartphone tem uma redução de sua capacidade de reconhecer eventos com o aumento da frequência das vibrações, as informações que deveriam ser representadas em suas respectivas faixas de frequência acabam rebatidas dentro da banda de frequência do sinal fornecido pelo smartphone, que possui largura máxima igual à metade de sua taxa de aquisição, como explica o teorema de Nyquist.

Figura 53 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 20 km/h

Figura 54 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 40 km/h

Figura 55 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 60 km/h

Com isso, ocorre um ganho de magnitude dos sinais de baixa frequência, que resulta em uma representação falsa do espectro. Esse é o efeito do *aliasing* no domínio da frequência, também

chamado de “dobra espectral”, já indicado nos testes de vibração (domínio do tempo), novamente presente tanto para os sinais coletados com a taxa de aquisição de 100 Hz e, sobretudo, para os sinais coletados com a taxa de 50 Hz.

Com a taxa de aquisição de 100 Hz, pode-se perceber, da Figura 50 a Figura 52, que os sinais de aceleração coletados pelo acelerômetro de referência são atenuados pelo smartphone, principalmente na faixa de 15 a 35 Hz, como já indicavam os testes de vibração. Já nas Figura 53 a 55, com a taxa de aquisição de 50 Hz, pode-se observar que a representação espectral do sinal de aceleração coletado pelo smartphone deixa de apresentar informações importantes a partir de 25 Hz, mas também com destaque entre 15 e 35 Hz. Com isso, aumenta-se o efeito do *aliasing* em toda a banda do sinal de aceleração do smartphone, principalmente na faixa de 0 até 17,5 Hz, devido à dobra espectral das frequências da faixa de 15 a 35 Hz.

Por meio da análise do espectro dos sinais de aceleração fornecidos pelos dois sensores, podem-se observar maiores magnitudes no espectro para frequências entre 10 e 15 Hz, que é a faixa de ressonância das rodas do veículo. Como explicam Sayers e Karamihas (1998), vibrações em torno de 5 Hz geram dores torácicas ou abdominais nos seres humanos e, por isso, os sistemas de suspensão dos veículos são produzidos para atenuar e distribuir essas oscilações para as frequências de 1 a 2 Hz e de 10 a 15 Hz, como mostra a Figura 56. O esquema apresentado serve apenas como base aos veículos em geral. Para modelos de veículos com quatro rodas, de diferentes modelos e com outras rotações, mais informações irão surgir no espectro.

Figura 56 – Perfil do espectro de aceleração da estrada filtrado pelo veículo (Adaptada de SAYERS e KARAMIHAS, 1998)

No trecho com nível de irregularidade intermediário, da Embrapa Pecuária Sudeste, também foram detectados eventos de alta frequência, com magnitudes relevantes e que o smartphone não foi capaz de representar para a taxa de aquisição de 100 Hz, como mostram as Figuras 57 a 59, novamente com um pior cenário para a taxa de 50 Hz, como ilustrado da Figura 60 a 62.

Figura 57 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 20 km/h

Figura 58 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 40 km/h

Figura 59 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 60 km/h

Figura 60 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 20 km/h

Figura 61 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 40 km/h

Figura 62 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 60 km/h

Em todos os casos se observou um acréscimo da magnitude dos eventos de alta frequência com o aumento da velocidade. Isso já era esperado, já que o aumento da velocidade aumenta a excitação do sistema de suspensão do veículo, que por sua vez aumenta o ganho ao perfil do pavimento coletado pelos acelerômetros.

Mesmo no segmento em que foram obtidos os menores níveis de irregularidade em termos de valores de IRI, da pista do Aeroporto Estadual de Araraquara, também houveram eventos em alta frequência, como mostram as Figuras 63 a 67 nas quais foram coletados sinais de aceleração pelo smartphone com taxa de aquisição de 100 Hz, e nas Figuras 68 a 72, para a taxa de aquisição de 50 Hz.

Percebe-se que os espectros de frequência dos sinais de aceleração obtidos pelo acelerômetro de referência não são originados pelo ruído desse sensor, mas por vibrações geradas tanto pelo sistema composto pelos componentes do veículo, quanto pelas características de irregularidade do trecho coletado, uma vez que o ruído apresenta menor magnitude e está presente em toda a banda de frequências medida. Isso pode ser observado pelos espectros obtidos nos três segmentos de pavimentos utilizados nesta pesquisa, que apresentam diferentes distribuições espectrais.

Figura 63 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 20 km/h

Figura 64 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 40 km/h

Figura 65 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 60 km/h

Figura 66 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 80 km/h

Figura 67 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 100 km/h

Figura 68 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 20 km/h

Figura 69 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 40 km/h

Figura 70 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 60 km/h

Figura 71 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 80 km/h

Figura 72 - Frequência da aceleração do smartphone, com taxa de aquisição de 50 Hz e do acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz, para a velocidade de 100 km/h

Com esses resultados, nota-se que, quanto maiores as frequências do perfil do pavimento, mais erros estarão presentes nos sinais fornecidos pelos smartphones e pior será sua representação no domínio da frequência. Isso novamente remete à importância da taxa de aquisição de dados desses dispositivos. No caso desta pesquisa, os dados coletados pelo modelo Samsung Galaxy Mini S5, por meio do aplicativo *AndroSensor*, apresentaram limitações devido à taxa de aquisição, que girava em torno de 58 Hz. Alguns autores trabalharam com taxas de aquisição de 50 Hz ou menos. Nesses casos, deve-se ter um cuidado maior com a aplicação dos dados.

Em outras pesquisas, também foram utilizadas taxas de 100 Hz. Nessa situação, seria possível “enxergar” um espectro de até 50 Hz, o que reduziria o erro na visualização de seu espectro. No entanto, como explicado pelo teorema de Nyquist, dois pontos é um número mínimo para visualizar uma onda e pode acarretar em erros. De qualquer maneira, é preciso considerar que os perfis medidos em outras pesquisas não apresentavam as mesmas condições. Com um sistema de suspensão que atenua mais as oscilações em altas frequências, por exemplo, os erros na visualização do espectro também podem ser reduzidos. Por outro lado, Sayers e Karamihas (1998) recomendam o uso de sistemas de suspensão rígidos para medidores do tipo resposta, por proporcionar ao veículo uma relação mais próxima com o perfil da estrada. Assim, o sistema adequado vai depender das condições de medição e de como os dados serão aplicados.

Na pesquisa de Douangphachanh e Oneyama (2014), por exemplo, os autores relacionaram a magnitude do espectro dos sinais de aceleração coletados por smartphones com o IRI calculado a partir dos dados coletados por um VIMS, para diferentes níveis de irregularidade. Neste caso, podem ocorrer erros na representação dos sinais no domínio da frequência que, por sua vez, podem comprometer a relação entre os índices calculados pelos dois métodos ou criar uma relação perturbada pelo efeito de *aliasing*.

Pelo mesmo motivo, o cálculo do IRI por meio do processamento dos sinais de aceleração fornecidos pelos smartphones deve ser tomado com cautela, uma vez que esse processo envolve o tratamento do sinal no domínio da frequência, já que a integração direta dos sinais não é possível. Portanto, ao realizar o cálculo dos deslocamentos dessa forma, a partir de dados que não tem uma representação real no domínio da frequência, muitos erros podem ser gerados, que afetarão diretamente o IRI calculado.

Nos testes de vibração, percebeu-se que o algoritmo representou adequadamente o deslocamento de um acelerômetro piezoelétrico até a frequência de 40 Hz. Entretanto, para o sinal fornecido pelo smartphone que não acompanha a frequência e amplitude de um sinal produzido por um sensor de referência, o cálculo dos deslocamentos também resulta em valores falsos conforme a frequência de oscilação aumenta, como pode ser observado na Figura 49, do item 3.2.6. Para baixas frequências de oscilação, como de 5 Hz, nas quais a taxa de aquisição de dados do smartphone possibilita a reconstrução de sinais com um erro menor, os deslocamentos calculados se aproximam dos reais. No entanto, a partir de 10 Hz as falhas passam a ser expressivas.

Isso não significa que os valores de IRI calculados por outros pesquisadores estejam incorretos. Como explicado, isso depende da taxa de aquisição dos modelos de smartphones utilizados, do espectro dos perfis dos pavimentos medidos, do veículo utilizado, da velocidade operacional e do algoritmo utilizado no cálculo dos deslocamentos. No caso desta pesquisa, foi aplicado um algoritmo desenvolvido por Slifka (2004) que foi modificado para ser utilizado como ferramenta de análise para esta abordagem.

Mesmo assim, é preciso ressaltar que a utilização desse sistema para o cálculo do IRI, mesmo que calculado corretamente, não equivale à de um perfilômetro, mesmo que a ordem de grandeza dos resultados seja semelhante. Isso porque os perfis obtidos são filtrados pelas características do veículo e, por isso, necessitam da calibração do sistema de medição por um

método de referência ou podem ser aplicados juntamente com uma modelagem dos veículos ou auxílio de outros sensores de mensuração de distância (em conjunto com um acelerômetro ou sistema a laser, infravermelho, ultrassom etc.).

Por fim, também foi avaliada a influência das falhas nos sinais de aceleração fornecidas pelos smartphones em altas frequências, no caso da aplicação desses dados em valores de RMSVA. Para essa abordagem, os dados coletados também não estão livres de erros. No entanto, apesar de também apresentarem falhas no domínio do tempo, devido à atenuação dos picos de aceleração e, por esse motivo, não representarem de forma fidedigna o comprimento de onda dos perfis medidos em eventos de altas frequências, conseguem identificar a variação da irregularidade da estrada. Em outras palavras, os dados coletados dessa forma conseguem representar uma variação da envoltória dos sinais de aceleração medidos e, com isso, serem relacionados à irregularidade do pavimento.

Para realizar essa análise, foi feito um teste de vibração para comparar o sinal fornecido pelo acelerômetro piezoresistivo com o acelerômetro piezoelétrico, utilizado nos testes de vibração, ambos com taxa de aquisição de 500 Hz. A Figura 73 traz um comparativo dos espectros de frequência produzidos pelos dois sensores, sendo que o sinal do acelerômetro piezoresistivo foi novamente plotado com auxílio do filtro passa-baixa *ButterWorth* de 2ª ordem, a fim de analisar se os espectros dos perfis coletados em campo sofreram alguma interferência do ruído do acelerômetro.

Figura 73 – Comparação entre os espectros produzidos pelo Acelerômetro Piezoelétrico e pelo acelerômetro piezoresistivo, para amplitude do sinal de aproximadamente 2 m/s²

Percebe-se o ruído produzido pelo acelerômetro piezoresistivo causa uma distorção do espectro apresentado por esse sensor. Também é possível notar que as magnitudes dos espectros não são idênticas. Isso ocorre porque os picos de aceleração medidos pelo acelerômetro piezoresistivo apresentaram certa discrepância em relação aos medidos pelo acelerômetro piezoeletrico, como pode ser visto da Figura 74 a 76. Mesmo com a presença do ruído, foram apontadas as frequências que ocorreram de fato nos testes de vibração, o que leva a crer que os eventos de alta frequência apontados nas análises dos espectros dos perfis coletados em campo são realmente pelas vibrações do veículo ocasionadas pelas irregularidades dos pavimentos.

Como o ruído produzido pelo acelerômetro piezoresistivo apresenta uma pequena magnitude em relação à amplitude dos perfis coletados em campo, podem ser ignorados nas análises espectrais deste item. Os sinais dos dois acelerômetros também foram comparados no domínio do tempo, como mostram as Figuras 74 a 76. Percebe-se que o acelerômetro piezoresistivo não apresenta a mesma qualidade do acelerômetro piezoeletrico para coleta de sinais de aceleração de baixas magnitudes. Mesmo assim, fornece uma envoltória de pontos que pode servir à análise de RMSVA, já que, diferentemente dos sinais coletados pelo smartphone Samsung Galaxy S5 Mini com o aplicativo *AndroSensor*, utilizados nas análises deste item, é capaz de coletar informações em alta frequência.

Figura 74 - Aceleração do acelerômetro piezoeletrico e do acelerômetro piezoresistivo nos testes de vibração, para uma amplitude de aproximadamente $2 m/s^2$

Figura 75 - Aceleração do acelerômetro piezoelétrico e do acelerômetro piezoresistivo nos testes de vibração, para uma amplitude de aproximadamente 6 m/s^2

Figura 76 - Aceleração do acelerômetro piezoelétrico e do acelerômetro piezoresistivo nos testes de vibração, para uma amplitude de aproximadamente 10 m/s^2

Da Figura 77 a 79 foram plotados exemplos de acelerações medidas simultaneamente pelo acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de 1000 Hz e com o smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, com taxa de aquisição de 100 Hz, pelo aplicativo *AndroSensor*, para cada

velocidade utilizada nas coletas. Novamente, os gráficos do acelerômetro piezoresistivo passaram em um filtro passa-baixa *Butterworth* de 2ª ordem em 100 Hz.

Figura 77 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, na Estrada Municipal Guilherme Scatena, a 20 km/h

Figura 78 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, na Estrada Municipal Guilherme Scatena, a 40 km/h

Figura 79 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, na Estrada Municipal Guilherme Scatena, a 60 km/h

Pode-se observar que os sinais de aceleração coletados pelos dois sensores não apresentaram as mesmas magnitudes. Isso pode ter ocorrido tanto pela menor taxa de aquisição dos dados fornecidos pelo smartphone, que atenua os picos de aceleração, quanto por falhas na representação desses picos de aceleração pelo acelerômetro piezoresistivo. Entretanto, observa-se que a envoltória de pontos fornecidos pelos dois dispositivos apresentam semelhanças.

No trecho da Embrapa Pecuária Sudeste, com condição intermediária em termos de irregularidade, percebe-se que os sinais de aceleração medidos pelos dois sensores têm menor semelhança quando comparados com aqueles obtidos para o trecho de maior irregularidade, principalmente para menores velocidades. Isso também se deve ao fato de que a ordem de grandeza do ruído produzido pelo acelerômetro piezoresistivo se aproxima do que seriam os sinais de aceleração reais, caso esse acelerômetro não apresentasse falhas.

Mesmo assim, como mostram as Figuras 80 a 82, que também trazem um exemplo de sinal de aceleração coletado pelo smartphone e pelo acelerômetro piezoresistivo, para cada velocidade utilizada nas coletas deste trecho, observam-se certas semelhanças entre os sinais obtidos pelos dois sensores, principalmente nos picos de aceleração medidos.

Figura 80 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, na Embrapa Pecuária Sudeste, a 20 km/h

Figura 81 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, na Embrapa Pecuária Sudeste, a 40 km/h

Figura 82 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, na Embrapa Pecuária Sudeste, a 60 km/h

Resultados semelhantes àqueles obtidos para o trecho intermediário da Embrapa Pecuária Sudeste foram observados para o trecho com menor nível de irregularidade, do Aeroporto Estadual de Araraquara. Como mostram as Figuras 83 a 87 também se nota que a semelhança entre os sinais de aceleração medidos pelos dois sensores é menor quando comparados com os obtidos para o trecho de maior irregularidade da Estrada Municipal Guilherme Scatena.

No trecho do Aeroporto Estadual de Araraquara, como foram utilizadas as velocidades de 20 a 100 km/h, percebe-se com maior facilidade que a correspondência entre os sinais cresce com o aumento da velocidade operacional. Isso porque a influência do ruído produzido pelo acelerômetro piezoresistivo é menor, já que a ordem de grandeza deste é constante, enquanto os sinais de aceleração relacionados aos perfis dos pavimentos medidos tem um ganho maior devido à uma maior excitação do sistema de suspensão do veículo, o que resulta na obtenção de sinais de aceleração de maior amplitude. Contudo, mesmo em velocidades baixas é possível notar uma correspondência entre os sinais coletados pelos dois sensores, principalmente nos picos de aceleração medidos.

Figura 83 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, no Aeroporto Estadual de Araraquara, a 20 km/h

Figura 84 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, no Aeroporto Estadual de Araraquara, a 40 km/h

Figura 85 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, no Aeroporto Estadual de Araraquara, a 60 km/h

Figura 86 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, no Aeroporto Estadual de Araraquara, a 80 km/h

Figura 87 - Sinal de Aceleração coletados pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, no Aeroporto Estadual de Araraquara, a 100 km/h

A fim de avaliar a comparação entre os dois sensores, no caso da aplicação desses sinais de aceleração em termos de RMSVA, foram elaborados gráficos de dispersão entre os valores de RMSVA obtidos com o smartphone, com taxa de aquisição de 100 Hz, e o IRI obtido com o Nível e Mira, entre os valores de RMSVA obtidos com o acelerômetro piezoresistivo, com taxa de aquisição de dados fixada em 1000 Hz e o IRI obtido com o Nível e Mira e entre os valores de RMSVA obtidos com o smartphone e o acelerômetro piezoresistivo. Para essas relações, devem-se utilizar equações que não cruzem a origem, já que, se o IRI for igual a 0 m/km a aceleração vertical medida também deverá ser igual a 0 m/s².

No entanto, a fixação do intercepto na origem dos eixos pode distorcer a análise da força de correlação entre essas variáveis. Como cita Eisenhauer (2003), forçar a regressão linear a cruzar a origem pode resultar em coeficientes de determinação (R^2) negativos que, conceitualmente, não podem ser interpretados, já que tal índice varia de 0 a 1. Nesse caso, os coeficientes de correção (R) calculados a partir desses valores seriam incoerentes. As Equações 2 e 3 mostram como o R^2 é calculado.

$$R^2 = \frac{\sum (Y_e - Y_m)^2}{\sum (Y_o - Y_m)^2} \quad \text{Equação 2}$$

Ou ainda

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_o - Y_e)^2}{\sum (Y_o - Y_m)^2} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

Y_o = valor observado;

Y_e = valor estimado (previsão);

Y_m = média das observações.

Quando a linha de tendência de um gráfico de dispersão é forçada a passar pela origem e alcança um mal ajuste, os dados podem exibir uma variação maior em torno da linha de regressão do que em torno da média dos pontos observados e, desse modo, fazer com que os termos que servem de base para a Equação 2 não sejam válidos, o que resulta em valores de R^2 inconsistentes ao se utilizar a Equação 2 ou $R^2 < 0$ ao se utilizar a Equação 3.

Mesmo que não se alcance valores de R^2 fora do intervalo de 0 a 1, os resultados podem mascarar a real força da correlação entre duas variáveis. Eisenhauer (2003) cita que essa não é uma questão meramente acadêmica, mas controversa e, por isso, tem sido discutida há muito tempo por vários autores. Comenta ainda que para linhas de tendência que cruzam a origem, a Equação 4 pode ser utilizada como alternativa.

$$R^2 = \frac{\sum Y_e^2}{\sum Y_o^2} \quad \text{Equação 4}$$

No entanto, Eisenhauer (2003) comenta que essa equação pode resultar em valores superiores aos obtidos normalmente pela Equações 3. Esses erros podem ser observados no exemplo mostrado na Figura 88, na qual foram utilizadas as Equações 3 e 4, que mostra a relação obtida entre os valores de IRI obtidos com os dados levantados pelo método de Nível e Mira e os valores de RMSVA alcançados pelo smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, na pista do Aeroporto Estadual de Araraquara, para a velocidade operacional de 100 km/h.

Figura 88 – Exemplo dos erros gerados no cálculo do coeficiente de correlação

Como apresentado na Figura 88, essas equações podem resultar em análises imprecisas. Para evitar a obtenção de falsos valores de coeficientes de correlação (R), os resultados mostrados na Tabela 2 não foram obtidos a partir de coeficientes de determinação de linhas de tendência que cruzam a origem dos eixos. Com isso, além do peso dos coeficientes de correlação, deve-se atentar para o valor dos interceptos obtidos nessas linhas de tendência que cruzam a origem dos eixos. Em termos práticos, quanto mais próximos de zero forem os interceptos obtidos e maiores os valores de R , mais apropriada será a relação entre essas variáveis.

Os resultados da Tabela 2 apresentam cinco pontos correspondem a cada subdivisão de 100 metros do total de 500 metros medidos em cada trecho. Os valores de RMSVA representam uma média de três viagens. É possível observar que, de maneira geral, os índices alcançam altos valores de coeficientes de correlação para a relação entre os valores de RMSVA obtidos pelo smartphone e pelo acelerômetro piezoresistivo. Não há indícios que mostrem uma relação direta entre o uso do acelerômetro piezoresistivo e o aumento do coeficiente de correlação para as relações entre os valores de RMSVA e o IRI. Para análise dessa tabela é preciso lembrar que o nível de irregularidade do segmento da Estrada Municipal Guilherme Scatena sofreu maior alteração e, por esse motivo, alcançou coeficientes de correlação mais baixos que aqueles obtidos na primeira coleta, como será visto no item 4.3.1. Além disso, as correlações dessa tabela foram feitas com uma média de três viagens, ao invés de dez.

Outro ponto a ser observado na Tabela 2 é que os dois segmentos com menor nível de irregularidade alcançaram coeficientes de correlação menores, tanto para as relações entre o RMSVA e o IRI, quanto para os valores de RMSVA do smartphone e acelerômetro piezoresistivo. Apesar dos sensores também apresentarem envoltórias dos sinais de aceleração semelhantes para esses segmentos, os níveis de irregularidade têm menor variação entre as subdivisões com extensão de 100 metros. Com isso, há uma redução no valor dos coeficientes de correlação obtidos nesses trechos. Essa influência é ainda maior pelo fato de que esses trechos, assim como na Estrada Municipal Guilherme Scatena, também apresentaram informações relevantes em altas frequências, o que faz com que alguns picos nos sinais de aceleração vertical que poderiam diferenciar o nível de irregularidade das subdivisões de 100 metros fossem atenuados pelo smartphone, como mostrado pelos espectros dos sinais medidos pelos dois sensores.

Tabela 2 - Comparação entre os valores de RMSVA obtidos pelo smartphone e acelerômetro (100 Hz) e acelerômetro piezoresistivo (1000 Hz), sem definição de intercepto no ponto de origem

Trecho	Velocidade (km/h)	IRI (y) x RMSVA[s] (x)		IRI (y) x RMSVA[a] (x)		RMSVA[a]* (y) x RMSVA[s]** (x)	
		Equações	R	Equações	R	Equações	R
Aeroporto	20	$y = 5,40.x$ $y = 0,60.x + 1,66$	0,05	$y = 3,27.x$ $y = -0,30.x + 2,03$	-0,03	$x(a) = 1,65.x(s)$ $x(a) = 1,29.x(s) + 0,13$	0,98
	40	$y = 3,11.x$ $y = 1,82.x + 0,77$	0,40	$y = 2,10.x$ $y = 0,83.x + 1,13$	0,28	$x(a) = 1,48.x(s)$ $x(a) = 1,53.x(s) - 0,03$	0,98
	60	$y = 2,39.x$ $y = 0,66.x + 1,35$	0,20	$y = 1,69.x$ $y = 0,99.x + 0,78$	0,39	$x(a) = 1,41.x(s)$ $x(a) = 1,27.x(s) + 0,11$	0,97
	80	$y = 1,90.x$ $y = 4,67.x - 2,73$	0,81	$y = 1,41.x$ $y = 1,67.x - 0,34$	0,38	$x(a) = 1,34.x(s)$ $x(a) = 0,44.x(s) + 0,89$	0,33
	100	$y = 1,73.x$ $y = -3,55.x + 5,68$	-0,46	$y = 1,27.x$ $y = -0,14.x + 2,07$	-0,04	$x(a) = 1,36.x(s)$ $x(a) = 1,70.x(s) - 0,36$	0,85
Embrapa	20	$y = 5,06.x$ $y = 3,29.x + 1,18$	0,40	$y = 4,08.x$ $y = 6,54.x - 2,03$	0,51	$x(a) = 1,24.x(s)$ $x(a) = 0,58.x(s) + 0,44$	0,91
	40	$y = 3,29.x$ $y = 2,94.x + 0,36$	0,60	$y = 2,59.x$ $y = 3,18.x - 0,76$	0,50	$x(a) = 1,27.x(s)$ $x(a) = 0,74.x(s) + 0,54$	0,97
	60	$y = 3,05.x$ $y = 2,68.x + 0,42$	0,66	$y = 2,64.x$ $y = 3,12.x - 0,61$	0,55	$x(a) = 1,15.x(s)$ $x(a) = 0,67.x(s) + 0,53$	0,94
Estrada Municipal Guilherme Scatena	20	$y = 6,60.x$ $y = 7,90.x - 1,82$	0,91	$y = 6,53.x$ $y = 8,63.x - 2,99$	0,94	$x(a) = 1,01.x(s)$ $x(a) = 0,94.x(s) + 0,10$	1,00
	40	$y = 3,38.x$ $y = 2,70.x + 1,91$	0,90	$y = 3,27.x$ $y = 2,71.x + 1,63$	0,91	$x(a) = 1,04.x(s)$ $x(a) = 1,01.x(s) + 0,08$	1,00
	60	$y = 2,77.x$ $y = 2,20.x + 1,93$	0,90	$y = 2,57.x$ $y = 2,04.x + 1,96$	0,92	$x(a) = 1,08.x(s)$ $x(a) = 1,11.x(s) - 0,10$	1,00

*RMSVA[a] = Valores obtidos com os dados coletados pelo acelerômetro piezoresistivo (m/s²);

**RMSVA[s] = Valores obtidos com os dados coletados pelo smartphone (m/s²);

Outra constatação é que a ordem de grandeza dos coeficientes de correlação obtidos para as relações dos valores de RMSVA obtidos com os dados dos dois sensores e os valores de IRI obtidos com o método de Nível e Mira são semelhantes para a maior parte dos casos, o que leva a crer que o uso do smartphone para avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos por meio da abordagem de valores de RMSVA não apresenta diferenças significativas quando comparada com um acelerômetro que possibilita maiores taxas de aquisição de dados. No entanto, deve-se levar em conta a influência do ruído produzido pelo acelerômetro piezoresistivo, que interferiu nos resultados obtidos.

Também foram analisados sinais de aceleração coletados pelo smartphone com o veículo parado, ou seja, com a marcha em ponto neutro, a fim de avaliar a influência do ruído produzido nesse cenário sobre os valores de RMSVA obtidos nos diferentes trechos utilizados nesta pesquisa. Um dos sinais foi coletado com o veículo desligado, outro com o veículo ligado, mas sem aceleração (sem pisar no pedal de aceleração), e os demais com um aumento progressivo da aceleração, para que assim fosse investigado o efeito das vibrações do motor em diferentes rotações. Os dados são apresentados nas Tabelas 3 a 5.

Tabela 3 – Influência do ruído produzido pelo smartphone sobre os valores de RMSVA obtidos para trechos com diferentes níveis de irregularidade e velocidade operacional de 20 km/h

Condição Inicial		Trecho	Velocidade 20 km/h	Trecho	Velocidade 20 km/h	Trecho	Velocidade 20 km/h
Veículo parado e marcha em ponto neutro	Ruído RMSVA (m/s ²)	Aeroporto Estadual de Araraquara RMSVA (m/s ²)	$\frac{[\text{RMSVA Ruído}]}{[\text{RMSVA Estrada}]}$ (%)	Embrapa Pecuária Sudeste RMSVA (m/s ²)	$\frac{[\text{RMSVA Ruído}]}{[\text{RMSVA Estrada}]}$ (%)	Estrada Municipal Guilherme Scatena RMSVA (m/s ²)	$\frac{[\text{RMSVA Ruído}]}{[\text{RMSVA Estrada}]}$ (%)
Veículo Desligado	0,10	0,37	27,57	0,76	13,35	1,34	7,60
Veículo Ligado [Sem acelerar]	0,13		35,93		17,40		9,90
Veículo Ligado [Baixa Aceleração]	0,10		27,59		13,36		7,60
Veículo Ligado [Aceleração moderada]	0,12		31,51		15,26		8,68
Veículo Ligado [Alta aceleração]	0,46		124,05		60,08		34,18

Tabela 4 – Influência do ruído produzido pelo smartphone sobre os valores de RMSVA obtidos para trechos com diferentes níveis de irregularidade e velocidade operacional de 40 km/h

Condição Inicial		Trecho	Velocidade 40 km/h	Trecho	Velocidade 40 km/h	Trecho	Velocidade 40 km/h
Veículo parado e marcha em ponto neutro	Ruído RMSVA (m/s ²)	Aeroporto Estadual de Araraquara RMSVA (m/s ²)	[RMSVA Ruído] ÷ [RMSVA Estrada] (%)	Embrapa Pecuária Sudeste RMSVA (m/s ²)	[RMSVA Ruído] ÷ [RMSVA Estrada] (%)	Estrada Municipal Guilherme Scatena RMSVA (m/s ²)	[RMSVA Ruído] ÷ [RMSVA Estrada] (%)
Veículo Desligado	0,10	0,59	17,21	1,12	9,10	2,78	3,69
Veículo Ligado [Sem acelerar]	0,13		22,43		11,86		4,80
Veículo Ligado [Baixa Aceleração]	0,10		17,22		9,11		3,69
Veículo Ligado [Aceleração moderada]	0,12		19,67		10,40		4,21
Veículo Ligado [Alta aceleração]	0,46		77,44		40,95		16,59

Tabela 5 – Influência do ruído produzido pelo smartphone sobre os valores de RMSVA obtidos para trechos com diferentes níveis de irregularidade e velocidade operacional de 60 km/h

Condição Inicial		Trecho	Velocidade 60 km/h	Trecho	Velocidade 60 km/h	Trecho	Velocidade 60 km/h
Veículo parado e marcha em ponto neutro	Ruído RMSVA (m/s ²)	Aeroporto Estadual de Araraquara RMSVA (m/s ²)	[RMSVA Ruído] ÷ [RMSVA Estrada] (%)	Embrapa Pecuária Sudeste RMSVA (m/s ²)	[RMSVA Ruído] ÷ [RMSVA Estrada] (%)	Estrada Municipal Guilherme Scatena RMSVA (m/s ²)	[RMSVA Ruído] ÷ [RMSVA Estrada] (%)
Veículo Desligado	0,10	0,78	13,19	1,20	8,54	4,75	2,16
Veículo Ligado [Sem acelerar]	0,13		17,18		11,12		2,81
Veículo Ligado [Baixa Aceleração]	0,10		13,20		8,54		2,16
Veículo Ligado [Aceleração moderada]	0,12		15,07		9,76		2,46
Veículo Ligado [Alta aceleração]	0,46		59,33		38,40		9,70

Os resultados mostram que o ruído produzido pelo smartphone tem maior influência quanto menor o nível de irregularidade do pavimento e menor a velocidade operacional. Como explicado por Gillespie *et al.* (1980), os erros aleatórios gerados pelos sistemas medidores do tipo resposta, assim como mensurações não-lineares características do equipamento utilizado, presentes mesmo após a calibração de seus sistemas, apresentam a mesma magnitude, independentemente do nível de irregularidade do pavimento, no entanto, quando as falhas são expressas em porcentagem, têm maior influência sobre os pavimentos com menor nível de irregularidade.

Também foram medidos os sinais de aceleração do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini e acelerômetro piezoresistivo com o veículo parado e ligado e com a marcha em ponto neutro, com o objetivo de analisar a magnitude do ruído medido como sinal de aceleração, produzido tanto pelo smartphone quanto pelo acelerômetro piezoresistivo, a fim de observar sua representação no domínio do tempo e da frequência. A Figura 89 apresenta o sinal de aceleração do smartphone e do acelerômetro de referência com o veículo parado e ligado e sem aceleração. A Figura 90 traz a representação dos sinais de aceleração mostrados na Figura 89 no domínio da frequência.

Figura 89 - Sinais de aceleração coletados com o veículo parado, sem acelerar e com a marcha em ponto neutro

Figura 90 – Espectro dos sinais de aceleração coletados com o veículo parado, sem acelerar e com marcha em ponto neutro

Pode-se observar que há um pico pronunciado em torno de 15 Hz e outro de maior magnitude em 30 Hz. O pico de aceleração medido em torno de 15 Hz equivale à rotação de aproximadamente 900 rpm, que representa a rotação do motor do veículo quando ligado e parado, com a marcha em ponto neutro. Já o pico observado na frequência de aproximadamente 30 Hz equivale às explosões que ocorrem nos cilindros do motor. Como o motor do veículo utilizado é do tipo quatro tempos, ocorre uma explosão em um dos quatro cilindros a cada meia rotação do motor. Também é possível notar a presença do ruído em toda a banda de frequências do acelerômetro piezoresistivo, no entanto, de magnitudes insignificantes, sendo este mais um indicativo de que as frequências apresentados nas análises espectrais foram provocadas de fato pela interação entre as irregularidades dos pavimentos e a dinâmica do veículo.

Para as demais condições, em que foram aplicados três níveis de rotação diferentes, mas novamente com a manutenção da marcha em ponto neutro, nas quais também foram plotados os sinais de aceleração medidos pelo smartphone e acelerômetro piezoresistivo, como mostram as Figuras 91, 94 e 97. Já o espectro de frequência foi representado tanto pela Transformada de Fourier, como mostram as Figuras 92, 95 e 98, a fim de permitir a visualização da magnitude desses sinais, quanto em gráficos de tempo-frequência, por meio da Transformada de Gabor, como mostram as Figuras 93, 96 e 99. Essa última representação foi utilizada para facilitar a visualização das frequências relevantes dentro da banda de frequências apresentadas, devido à dificuldade em manter uma rotação constante.

Figura 91 – Sinais de aceleração coletados com o veículo parado, com baixas rotações e marcha em ponto neutro

Figura 92 - Sinais de aceleração coletados com o veículo parado, com baixas rotações e marcha em ponto neutro

Figura 93 – Análise tempo-frequência do sinal de aceleração coletado com o veículo parado, com baixas rotações e marcha em ponto neutro

Figura 94 - Sinais de aceleração coletados com o veículo parado, com rotações moderadas e marcha em ponto neutro

Figura 95 – Espectro dos sinais de aceleração coletados com o veículo parado, com rotações moderadas e marcha em ponto neutro

Figura 96 - Análise tempo-frequência do sinal de aceleração coletado com o veículo parado, com rotações moderadas e marcha em ponto neutro

Figura 97 - Sinais de aceleração coletados com o veículo parado, com altas rotações e marcha em ponto neutro

Figura 98 - Espectro dos sinais de aceleração coletados com o veículo parado, com altas rotações e marcha em ponto neutro

Figura 99 - Análise tempo-frequência do sinal de aceleração coletado com o veículo parado, com altas rotações e marcha em ponto neutro

Infelizmente, o veículo utilizado não fornece a rotação do motor em seu painel. No entanto, tem-se a ideia de que as coletas ocorreram em baixas rotações, já que assim era mais fácil controlar a velocidade do veículo. As coletas com velocidade operacional de 20 km/h ocorreram todas em terceira marcha, para as velocidades de 40 km/h e 60 km/h em quarta marcha e para as velocidades de 80 km/h e 100 km/h, em quinta marcha.

Pode-se observar que mesmo com o veículo desligado e parado, com a marcha em ponto neutro, é fornecido um sinal de aceleração. O sinal é produzido pelo ruído do sensor do smartphone, com magnitude significativa presente nos sinais de aceleração coletados em campo. Consequentemente, há uma interferência sobre os valores de RMSVA calculados, principalmente em baixas velocidades e em estradas com baixos níveis de irregularidade, como citado anteriormente. Isso significa que as linhas de tendência obtidas nos gráficos de dispersão elaborados para as relações entre os valores de RMSVA obtidos com o smartphone e os valores de IRI obtidos a partir do Nível e Mira não cruzam naturalmente a origem dos eixos.

Percebe-se que em baixas rotações as vibrações do motor não têm grande influência sobre os dados coletados e que a grande parte do ruído gerado se deve aos próprios sinais de aceleração produzidos pelos MEMs instalados nos smartphones. Com a análise da influência dos espectros dos sinais de aceleração coletados em campo, tanto com o veículo em movimento, quanto

parado, ressalta-se a importância da calibração desse sistema para a avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos, seja com uso de um acelerômetro como o piezoresistivo ou de um smartphone. Desse modo, a calibração desses sistemas por meio de um método de mensuração de referência, como é o caso do levantamento realizado por Nível e Mira, com o uso de vários trechos com diferentes níveis de irregularidade e diferentes velocidades operacionais, possibilita o aumento da qualidade da avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos a partir desse sistema, como será visto no item 4.2.4.

4.2.3 ANÁLISE DO APLICATIVO UTILIZADO NAS COLETAS DE CAMPO

Este tópico tem o objetivo de analisar o aplicativo *AndroSensor* como a possível causa das falhas dos sinais de aceleração gerados pelos smartphones nos testes de vibração e análise espectral dos perfis coletados em campo. Sendo assim, realizaram-se novos testes de vibração no laboratório, com auxílio do excitador *Shaker*, por meio dos mesmos métodos aplicados nos primeiros testes de vibração, mas, desta vez, com o uso do software *Accelerometer Analyzer*. Esse aplicativo permite o uso de algumas taxas de aquisição fixas. Para esses testes foram escolhidas as opções “*Game*”, de 50 Hz e “*Fatest*”. Nesse último caso, a taxa varia de acordo com a capacidade do modelo do smartphone.

Foram aplicadas as mesmas frequências de oscilação já selecionadas nos primeiros testes de vibração, com a inclusão das frequências de oscilação de 75 e 100 Hz e manutenção da taxa de aquisição de dados do acelerômetro piezoelétrico em 500 Hz. Essas frequências foram adicionadas para estimar o desempenho dos três modelos de smartphones caso fossem utilizados em coletas de campo com o uso do aplicativo *Accelerometer Analyzer*. No caso do modelo Samsung Galaxy S5 Mini, a maior taxa alcançada com a opção “*Fatest*” foi de 200 Hz e a do Motorola Moto X Play e Sony Xperia SP de 100 Hz.

A taxa de aquisição de 50 Hz também utilizada com objetivo de investigar se as falhas ocorreram de fato pelos erros de *aliasing*, causados pela baixa taxa de aquisição ou por outros fatores relacionados ao aplicativo *AndroSensor*. Os resultados desses testes de vibração, para a amplitude de aproximadamente 2 m/s², com os modelos Samsung Galaxy S5 Mini, Motorola Moto X Play e Sony Xperia SP são mostrados nas Figuras 100 a 105. Os resultados obtidos para todas as amplitudes testadas podem ser consultados no Apêndice B.

Figura 100 – Sinal de aceleração do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, aplicativo *Accelerometer Analyser*, com taxa de aquisição de 50 Hz

Figura 101 - Sinal de aceleração do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, aplicativo *Accelerometer Analyser*, com taxa de aquisição de 200 Hz

Figura 102 - Sinal de aceleração do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Motorola Moto X Play, aplicativo *Accelerometer Analyser*, com taxa de aquisição de 50 Hz

Figura 103 – Sinal de aceleração do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Motorola Moto X Play, aplicativo *Accelerometer Analyser*, com taxa de aquisição de 100 Hz

Figura 104 - Sinal de aceleração do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Sony Xperia SP, aplicativo *Accelerometer Analyser*, com taxa de aquisição de 50 Hz

Figura 105 - Sinal de aceleração do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Sony Xperia SP, aplicativo *Accelerometer Analyser*, com taxa de aquisição de 100 Hz

Pode-se observar que houve uma redução significativa das falhas de atenuação dos picos de aceleração com o uso de maiores taxas de aquisição fornecidas pelo aplicativo *Accelerometer Analyser* comparado aos resultados obtidos nos primeiros testes de vibração realizados com o aplicativo *AndroSensor*. Além disso, percebe-se que o aumento da taxa de aquisição com um mesmo aplicativo reduz significativamente a atenuação dos picos de aceleração, o que mostra que os erros são causados principalmente pela obtenção de uma taxa de aquisição de dados insuficiente. Os resultados também indicaram que há diferença entre os sinais medidos por modelos de smartphones diferentes, como mostrado nos resultados obtidos pelos modelos Motorola Moto X Play e o Sony Xperia SP, que apresentaram a mesmo limite para a taxa de aquisição de dados, com uso de um mesmo aplicativo, mas alcançaram desempenhos distintos.

Os sinais de aceleração medidos com o aplicativo *Accelerometer Analyser* praticamente não apresentaram dados repetidos, o que acarretou em um sinal mais uniforme, comparado aos do aplicativo *AndroSensor*. Levantou-se a hipótese de que o fato do aplicativo *AndroSensor* medir dados de GPS simultaneamente fosse o causador das falhas em sua coleta de dados. Por isso, foi feito o download do aplicativo *Endomondo* no smartphone Sony Xperia SP, responsável pela coleta de dados de GPS do smartphone, que passou por testes com o uso simultâneo dos dois aplicativos, a fim de avaliar se o desempenho do aplicativo *Accelerometer Analyser* se mantinha. O resultado pode ser observado na Figura 106.

Figura 106 – Sinais obtidos pelo smartphone Sony Xperia SP, taxa de aquisição de 100 Hz, aplicativo *Accelerometer Analyser*, com e sem coleta dos dados de GPS do aparelho

Pode-se observar, pela Figura 106, que o aplicativo *Accelerometer Analyser* manteve um bom desempenho, mesmo com o uso simultâneo do aplicativo *Endomondo*, responsável pela coleta de dados do GPS do smartphone, o que indica que o aplicativo *Accelerometer Analyser* provavelmente seria o mais indicado para a coleta de dados de smartphones para a avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos, tanto para a aplicação dos dados no domínio do tempo quanto no domínio da frequência.

Por esse motivo, foram plotados os espectros de frequência desses mesmos sinais de aceleração, coletados pelo acelerômetro piezoelétrico e pelos três modelos de smartphones testados, com o objetivo de avaliar a representação dos sinais de aceleração medidos por esses dispositivos no domínio da frequência, quando comparados aos obtidos por um acelerômetro de referência, nesse caso, do acelerômetro piezoelétrico. Esses resultados são apresentados nas Figuras 107 a 109.

Figura 107 – Espectro de frequência dos sinais do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, com amplitude de aproximadamente 2 m/s²

Figura 108 - Espectro de frequência dos sinais do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Motorola Moto X Play, com amplitude de aproximadamente 2 m/s²

Figura 109 - Espectro de frequência dos sinais do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Sony Xperia SP, com amplitude de aproximadamente 2 m/s²

Percebe-se que há uma redução da atenuação dos picos de aceleração quando se comparam esses resultados com aqueles obtidos na análise dos espectros dos perfis coletados em campo

pelo smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, o que leva a crer que o uso do aplicativo *Accelerometer Analyzer* chegaria a melhores resultados quando comparado ao *AndroSensor*, no que diz respeito ao uso desses sinais no domínio da frequência.

Também é possível notar que o smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, por ter uma taxa de aquisição maior que a dos outros modelos de smartphone, alcançou espectros de até 100 Hz, que é a máxima frequência que o aparelho seria capaz de medir, de acordo com o teorema de Nyquist. O smartphone Motorola Moto X Play, por apresentar a metade da taxa de aquisição do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, apresentou a frequência de 50 Hz como limite. Já o smartphone Sony Xperia SP não apresentou uma taxa constante, mas uma taxa que variou em torno de 100 Hz, o que fez com que o sinal não apresentasse uma boa representação no domínio da frequência e também o aumento do efeito do *aliasing*, um dos motivos pelos quais os sinais medidos por esse aparelho também apresentou o pior desempenho nos testes de vibração.

Como houve uma melhora significativa dos sinais medidos com o novo aplicativo, foi novamente calculado o deslocamento vertical a partir dos sinais de aceleração apresentados na Figura 101, a partir do algoritmo de Slifka (2004), a fim de analisar novamente a possibilidade do cálculo adequado dos deslocamentos verticais, desta vez com um sinal de aceleração mais parecido com aquele fornecido por um acelerômetro piezoelétrico, com taxa de aquisição de 500 Hz. O resultado é apresentado na Figura 110.

Figura 110 – Deslocamento calculado a partir dos sinais do acelerômetro piezoelétrico e do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, com taxa de aquisição de 200 Hz

Percebe-se que o uso da taxa de aquisição de 200 Hz fez com que as falhas apresentadas nos sinais de aceleração fornecidos pelo smartphone Samsung Galaxy S5 Mini nos primeiros testes de vibração fossem reduzidos, mas não eliminados. Isso porque o aumento das frequências de oscilação exige uma taxa de aquisição cada vez maior para se evitar o erro na amplitude dos sinais. Essas falhas influenciam no deslocamento calculado na Figura 101.

Essa melhoria seria ainda mais percebida nos levantamentos de campo, uma vez que as magnitudes dos sinais medidos nos trechos utilizados nessa pesquisa, apesar de alcançarem altas frequências, não chegaram a 100 Hz, como nos ensaios de vibração. Com isso, os novos testes mostraram, novamente, que a taxa de aquisição dos dados obtidos pelos smartphones é um fator determinante, principalmente quando os dados são tratados no domínio da frequência, seja para relacionar a frequência dos sinais de aceleração fornecidos pelos smartphones com a irregularidade de um pavimento, seja para a obtenção do índice IRI.

Assim, deve-se levar em conta não só o modelo de smartphone, mas também o software de aquisição dos dados. Nesta pesquisa, foi utilizado apenas o aplicativo *AndroSensor* para a comparação dos valores de RMSVA a partir do smartphone Samsung Galaxy S5 Mini e o IRI calculado a partir dos dados levantados pelo Nível e Mira. Entretanto, apesar do aplicativo apresentar a limitação na taxa de aquisição de dados, essa falha tem menor influência quando a abordagem é feita apenas no domínio do tempo, como mostrado no item 4.2.2. Além disso, o *AndroSensor* tem a vantagem de permitir a obtenção simultânea das coordenadas fornecidas pelo GPS e dos sinais de aceleração, o que facilita a coleta e a compatibilização dos dados.

No caso do *Accelerometer Analyzer*, o aplicativo possibilita uma taxa de aquisição de dados maior, mas com certa inflexibilidade, já que permite apenas a escolha de taxas pré-fixadas (*Normal*, *UI*, *Game* e *Faster*), além de não ter a opção de coleta de dados do GPS. O ideal seria optar por um software que unisse as duas vantagens ou então desenvolver um de acordo com as necessidades da aplicação, como realizado por Buttlar e Islam (2014) e Forslof (2013).

No caso das pesquisas em que foi calculado o IRI, deve-se tomar cuidado com os resultados obtidos. Na pesquisa de Hanson *et al.* (2014), por exemplo, os autores utilizaram três modelos de smartphones distintos. As taxas de aquisição foram de 48 Hz para dois dos três smartphones, e 32 Hz para o outro. Essas taxas, como evidenciado nos testes de vibração e nos espectros dos perfis coletados em campo, podem gerar erros nos cálculos dos deslocamentos verticais e, consequentemente, no cálculo do IRI.

Esse pode ser um dos fatores que levaram às diferenças de resultados encontradas por esses autores. No caso da pesquisa de Buttlar e Islam (2014), por exemplo, os autores observaram que para uma estrada com valores de IRI de aproximadamente 2 a 3 m/km, um smartphone subestimou os valores de IRI encontrados por um perfilômetro inercial a laser. Já na pesquisa de Hanson *et al.* (2014), para outra estrada com faixa de irregularidade similar, os autores notaram que os valores de IRI obtidos por um determinado smartphone foram superiores àqueles medidos por um perfilômetro inercial a laser. Obviamente, inúmeros fatores podem ter levado a esses resultados, já que se tratam de pesquisas distintas com diferentes condições.

A baixa taxa de aquisição de dados causa atenuação dos sinais de aceleração tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, sendo que o efeito de *aliasing* estará presente quando a taxa de aquisição dos dados for menor do que a taxa de Nyquist. A atenuação dos sinais de aceleração farão com que os smartphones subestimem o nível de irregularidade do pavimento. Caso ocorra o *aliasing*, os sinais de baixa frequência podem ter magnitudes maiores do que deveriam, bem como apresentar baixas magnitudes em altas frequências. Nesse caso, abordagens que utilizem esses dados no domínio da frequência, como no cálculo da IRI, podem chegar a resultados imprecisos, podendo indicar tanto um valor de irregularidade superior quanto inferior ao real nível de irregularidade de um pavimento.

Isso não significa que os valores de IRI calculados por outros pesquisadores estejam incorretos, pois os resultados dependem da taxa de aquisição de dados utilizada, do espectro de frequência dos pavimentos medidos, da resposta dinâmica do veículo utilizado, que varia de acordo com suas características dinâmicas (incluindo sua velocidade) e do algoritmo utilizado no cálculo dos deslocamentos. De qualquer forma, o cálculo do IRI a partir dos sinais de aceleração medidos por smartphones fixados em veículos deve ser tomado com cautela.

Se o interesse é aplicar diretamente os valores IRI, o cálculo deve incluir a modelagem do veículo ou assistência de outros sensores de medição de distância (laser, infravermelho, ultrassom, etc.) para remover a influência da resposta do veículo no perfil de pavimento medido. Independentemente se os deslocamentos foram calculados corretamente, a abordagem não equivale a de um perfilômetro, mesmo que a ordem de grandeza dos resultados seja semelhante. Sem a modelagem do veículo, essa abordagem requer um procedimento de calibração por meio de um método de referência como aplicado aos medidores de irregularidade do tipo resposta.

Esses resultados apontam a importância da taxa de aquisição de dados. Recomenda-se, portanto, a utilização da maior taxa de aquisição de dados possível. Isso porque não é possível conhecer

de antemão as magnitudes dos sinais coletados nas estradas, as quais dependem tanto da resposta de suspensão do veículo utilizado quanto das características do pavimento mensurado. Cabe ressaltar, novamente, que os resultados obtidos em diferentes pesquisas foram utilizadas com outros modelos de veículos, outros softwares de aquisição de dados, outros modelos de smartphone e com outros perfis de pavimentos. Portanto, as discussões presentes nesta pesquisa não têm intenção de apontar erros, mas servir como contribuição à análise de resultados obtidos por essas e outras futuras pesquisas correlatas.

4.2.4 CÁLCULO DOS VALORES DE RMSVA

Este tópico irá tratar dos dados coletados nos primeiros levantamentos desta pesquisa, ou seja, que ocorreram antes dos testes de vibração e dos levantamentos de campo realizados para a obtenção do espectro de frequência dos segmentos utilizados neste estudo. Assim, logo após realizar a medição dos perfis dos pavimentos com o Nível e Mira, foram coletados sinais de aceleração verticais pelo smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, a partir do aplicativo *AndroSensor*, com taxa de aquisição de 100 Hz.

Na Estrada Municipal Guilherme Scatena, por questões operacionais e de segurança, devido às más condições do pavimento, não foi possível trafegar com as velocidades de 80 e 100 km/h. Como citaram Sayers e Karamihas (1998), teoricamente não há limite máximo para a irregularidade, embora pavimentos com valores de IRI acima de 8 m/km só possam ser transitados a velocidades reduzidas.

No segmento da Embrapa Pecuária Sudeste também não foi possível coletar dados com as velocidades de 80 e 100 km/h. Nesse caso, o motivo não foi o alto nível de irregularidade do trecho, mas a falta de espaço para acelerar e desacelerar o veículo até que alcançasse tais velocidades no momento da coleta dos dados, antes do início do segmento, assim como para desacelerar ao fim do mesmo. Além disso, velocidades acima de 60 km/h aumentariam o risco de acidentes devido ao fluxo de máquinas, veículos e animais no local.

A classificação e os limites de aceitabilidade dos níveis de irregularidade variam de um país para outro. No Brasil, como mostra a Tabela 6 do Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006), o segmento da Estrada Municipal Guilherme Scatena recebe o conceito “Péssimo”, a via da Embrapa Pecuária Sudeste de “Regular” a “Ruim” e a faixa medida na pista do Aeroporto Estadual de Araraquara de “Bom” a “Excelente”.

Tabela 6 – Relação entre a condição do pavimento e o IRI (m/km)

Excelente	1,0 - 1,9
Bom	1,9 - 2,7
Regular	2,7 - 3,5
Ruim	3,5 - 4,6
Péssimo	> 4,6

Fonte: DNIT - Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (2006)

As Figuras 111 a 113 mostram os sinais de acelerações verticais coletadas pelo smartphone nos três pavimentos utilizados. Cada figura apresenta, como exemplo, um resultado para cada velocidade operacional em uma única viagem. Nesses gráficos, é possível observar que a ordem de grandeza das acelerações medidas na Estrada Guilherme Scatena, como esperado, é significativamente maior do que nos outros dois trechos. A pista do Aeroporto Estadual de Araraquara apresenta as amplitudes mais baixas e o segmento da Embrapa Pecuária Sudeste apresenta valores intermediários entre os dos outros dois trechos. Também se observa, para todos os segmentos, o aumento da magnitude dos sinais de aceleração com o aumento da velocidade.

Figura 111 – Sinais de aceleração: Estrada Municipal Guilherme Scatena

Figura 112 – Sinais de aceleração: Embrapa Pecuária Sudeste

Figura 113 – Sinais de aceleração: Aeroporto Estadual de Araraquara

Para analisar a repetitividade dos dados coletados pelo smartphone, foram calculados valores médios de RMSVA para 10 viagens de coleta, além do desvio padrão e o coeficiente de variação de cada trecho e velocidade operacional utilizados. Nas Tabelas 7, 8 e 9, são apresentados os resultados para o trecho da Estrada Municipal Guilherme Scatena, Embrapa Pecuária Sudeste e Aeroporto Estadual de Araraquara respectivamente.

Tabela 7 - Análise da repetitividade do índice RMSVA calculado para um total de 10 viagens na Estrada Municipal Guilherme Scatena

Seção (m)	Velocidade (km/h)	RMSVA Médio (m/s ²)	σ	CV (%)
0-100	20	1,16	0,03	2,62
100-200	20	1,28	0,07	5,65
200-300	20	1,62	0,07	4,45
300-400	20	1,51	0,08	5,45
400-500	20	1,17	0,04	3,74
Média =		1,35	0,06	4,38
0-100	40	2,32	0,12	5,16
100-200	40	2,73	0,14	5,03
200-300	40	3,63	0,16	4,45
300-400	40	3,11	0,16	5,28
400-500	40	2,09	0,13	6,20
Média =		2,78	0,14	5,23
0-100	60	4,00	0,24	6,04
100-200	60	4,35	0,26	5,96
200-300	60	6,67	0,40	6,01
300-400	60	5,29	0,24	4,49
400-500	60	3,42	0,20	5,89
Média =		4,75	0,27	5,68

Tabela 8 - Análise da repetitividade do índice RMSVA calculado para um total de 10 viagens na via da Embrapa Pecuária Sudeste

Seção (m)	Velocidade (km/h)	RMSVA Médio (m/s ²)	σ	CV (%)
0-100	20	0,74	0,03	3,79
100-200	20	0,75	0,02	3,19
200-300	20	0,77	0,03	4,09
300-400	20	0,76	0,02	1,97
400-500	20	0,80	0,03	4,00
Média =		0,77	0,03	3,41
0-100	40	1,06	0,03	3,23
100-200	40	1,09	0,05	4,14
200-300	40	1,13	0,03	2,94
300-400	40	1,10	0,04	3,62
400-500	40	1,24	0,05	3,85
Média =		1,12	0,04	3,56
0-100	60	1,09	0,04	3,94
100-200	60	1,17	0,05	4,29
200-300	60	1,24	0,04	2,94
300-400	60	1,10	0,06	5,52
400-500	60	1,40	0,06	4,26
Média =		1,20	0,05	4,19

Tabela 9 - Análise da repetitividade do índice RMSVA calculado para um total de 10 viagens na pista do Aeroporto Estadual de Araraquara

Seção (m)	Velocidade (km/h)	RMSVA Médio (m/s²)	σ	CV (%)
0-100	20	0,39	0,02	4,71
100-200	20	0,38	0,02	4,72
200-300	20	0,37	0,02	4,30
300-400	20	0,36	0,02	4,67
400-500	20	0,36	0,02	4,40
Média =		0,37	0,02	4,56
0-100	40	0,65	0,03	4,26
100-200	40	0,59	0,03	4,46
200-300	40	0,61	0,04	6,16
300-400	40	0,55	0,02	3,60
400-500	40	0,56	0,03	4,53
Média =		0,59	0,03	4,60
0-100	60	0,80	0,05	5,99
100-200	60	0,82	0,04	4,49
200-300	60	0,81	0,05	5,81
300-400	60	0,74	0,04	5,52
400-500	60	0,71	0,03	4,67
Média =		0,78	0,04	5,30
0-100	80	1,02	0,04	4,15
100-200	80	1,00	0,08	7,88
200-300	80	1,01	0,09	9,26
300-400	80	0,97	0,05	4,74
400-500	80	0,94	0,05	4,84
Média =		0,99	0,06	6,17
0-100	100	1,11	0,06	5,41
100-200	100	1,06	0,07	6,78
200-300	100	1,05	0,05	4,74
300-400	100	1,03	0,06	5,41
400-500	100	0,99	0,06	6,36
Média =		1,05	0,06	5,74

De um modo geral, a velocidade e o nível de irregularidade são os fatores que podem influenciar na repetitividade dos valores de RMSVA calculados, uma vez que ambos podem representar um obstáculo à manutenção das mesmas condições de coleta, como a posição lateral do veículo, a coincidência dos pontos de início e término dos trechos, a constância da velocidade, além da influência do ruído gerado pelo smartphone, que vão afetar a ordem de grandeza dos resultados,

sendo tanto maior quanto menor a velocidade e menor o nível de irregularidade do pavimento. Mesmo assim, os valores de desvio padrão e coeficiente de variação não apresentaram diferença significativa entre os trechos e velocidades medidas, sendo que, para diferentes cenários de coleta, o valor de coeficiente de variação médio mínimo foi de 3,41% e valor médio máximo foi de 6,17%. Buttlar e Islam (2014) também encontraram baixos coeficientes de variação ao analisar a repetitividade de valores IRI obtidos com os dados de um smartphone, menores que 20% para 3 das 40 seções (de cerca de 160 metros) utilizadas em seu estudo, obtidas a partir de 5 viagens de coleta para cada seção.

Pode-se considerar que os valores obtidos com o cálculo de valores de RMSVA a partir dos sinais de aceleração verticais fornecidos pelo smartphone Samsung Galaxy S5 Mini apresentaram repetitividade aceitável para coleta de dados em nível de rede. Em sua pesquisa, Hanson *et al.* (2014) mencionam a classificação dos valores de IRI esperados para cada tipo de via presente no trabalho de Sayers e Karamihas (1998) e citam como exemplo o caso das pistas de aeroportos e autoestradas, nas quais a faixa de IRI esperada é de 0 a 2 m/km, ou seja, uma variação de 10% nessa faixa provavelmente não resultaria em erros de classificação para fins de um SGP em nível de rede. Além disso, ao se tomar como base comparativa o limite de 5% para o coeficiente de variação de um perfilômetro inercial (ASTM E 1364), pode-se dizer que os valores alcançados para um sistema baseado em smartphones, entre 5 e 10%, são razoáveis.

4.3 RELAÇÃO ENTRE OS DADOS OBTIDOS PELO MÉTODO DE NÍVEL E MIRA E PELO SMARTPHONE

Neste tópico serão analisadas as relações entre os valores de RMSVA e o IRI. Cabe ressaltar novamente que os valores RMSVA analisados neste tópico se referem aos levantamentos realizados logo após a coleta dos dados com o Nível e Mira, diferentes daqueles mostrados na tabela 2, do item 4.2.1, obtidos a partir dos levantamentos realizados para as análises espectrais.

4.3.1 CORRELAÇÃO DO RMSVA DO SMARTPHONE COM O IRI DO NÍVEL E MIRA

O IRI calculado a partir do método de Nível e Mira foi comparado com os valores de RMSVA obtidos a partir das acelerações medidas pelo smartphone Samsung Galaxy S5 Mini. Foram elaborados gráficos de dispersão, a fim de analisar a relação entre essas variáveis, para os três trechos de pavimentos medidos, com subdivisões de 100 metros. Os valores de RMSVA equivalem a média das 10 viagens realizadas para cada velocidade. A seguir são apresentadas as Figuras 114 a 116, que mostram os resultados para o trecho da Estrada Municipal Guilherme

Scatena. Assim como no item 4.2.2, são apresentados coeficientes de correlação de Pearson (R) obtidos a partir de equações de ajuste que apresentam intercepto (x, y) e a equação da linhas de tendência que cruzam a origem (RMSVA, IRI), as quais estão apresentadas nos gráficos.

Figura 114 – Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para a Estrada Municipal Guilherme Scatena, com velocidade operacional de 20 km/h

Figura 115 - Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para a Estrada Municipal Guilherme Scatena, com velocidade operacional de 40 km/h

Figura 116 – Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para a Estrada Municipal Guilherme Scatena, com velocidade operacional de 60 km/h

Pode-se notar uma boa relação entre os valores de IRI obtidos a partir do método de Nível e Mira e os valores de RMSVA calculados a partir dos sinais de aceleração verticais medidos pelo smartphone e que essa correspondência varia de acordo com a velocidade operacional. Essa dependência foi observada com base nas equações de ajuste obtidas para a obtenção dos coeficientes de correlação. Apesar de apresentarem valores de R próximos, de 0,95 para a velocidade de 20 km/h e 0,96 para as velocidades de 40 km/h e 60 km/h, estas duas velocidades apresentaram interceptos mais próximos da origem (0,0). Isso pode ser explicado pelo fato de que, a uma velocidade mais baixa, as irregularidades do pavimento provocam uma excitação menor do sistema de suspensão do veículo e, assim, o sistema tem menor capacidade para medir os diferentes comprimentos de onda presentes no perfil do pavimento, que contribuem para os valores obtidos nos índices de irregularidade como o IRI.

Como citam Gillespie *et al.* (1986), a velocidade operacional mínima para medidores de irregularidade do tipo reposta é limitada em aproximadamente 25 km/h, já que em velocidades baixas existe o efeito da “envoltória dos pneus” sobre as irregularidades de alta frequência, devido à absorção de pequenas saliências pelo contato com o pneu. Além disso, a menores

velocidades o veículo deixa de incluir maiores comprimentos de onda e, assim, o nível de irregularidade pode ser reduzido.

Sayers e Karamihas (1998) explicam que a velocidade de 25 km/h deve ser vista como um limite inferior para a obtenção de perfis (no caso de perfilômetros) para análises típicas, como do IRI. Se os perfis são analisados com transformações matemáticas que envolvem apenas comprimentos de onda curtos, a velocidade pode ser reduzida para 15 km/h. Para análises em que comprimentos de onda maiores são de interesse, como no caso do IRI, devem ser utilizadas velocidades mais altas. Comentam ainda que para velocidades muito baixas, a aceleração vertical é muito pequena, mesmo para comprimentos de onda de 15 m ou menos.

Além disso, o ruído produzido pelos smartphones tem efeito maior em baixas velocidades, já que sua amplitude se aproxima do sinal medido e, com isso, diminui sua relação com a irregularidade real do pavimento. Presume-se que, por esses motivos, nesta e em outras pesquisas que também trabalharam com smartphones para avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos, foram obtidos melhores resultados para maiores velocidades, como no estudo de Forslof (2013), que utilizou velocidades entre 60 a 80 km/h para os índices de irregularidade calculados (cIRI). Infelizmente, não foi possível coletar dados com velocidades maiores que 60 km/h em dois dos três trechos medidos.

Como resultado, a diferença entre os valores máximos e mínimos de RMSVA calculados são menores para menores velocidades e maiores para velocidades maiores, o que faz com que, neste último caso, haja uma distinção maior entre o nível de irregularidade de cada segmento de 100 metros utilizados no cálculo dos índices de irregularidade e, conseqüentemente, em coeficientes de correlação maiores e interceptos mais próximos da origem para maiores velocidades. Isso pode ser observado, principalmente, para os dois segmentos de 100 metros com maior nível de irregularidade da Estrada Municipal Guilherme Scatena, em que o IRI calculado a partir do levantamento realizado pelo Nível e Mira apresenta uma diferença de 2,9 m/km entre as duas subdivisões com maior irregularidade (12,5 m/km e 9,6 m/km), enquanto o smartphone apresentou uma diferença de apenas 0,1 m/s² entre esses mesmos segmentos (1,6 m/s² e 1,5 m/s²).

Também foram elaborados gráficos de dispersão para o segmento da pista do Aeroporto Estadual de Araraquara. Para esse trecho, os coeficientes de correlação indicaram uma correlação menor entre os valores de IRI obtidos a partir do Nível e Mira e os valores de RMSVA com o smartphone, quando comparados com os obtidos no segmento da Estrada

Municipal Guilherme Scatena, como mostram as Figuras 117 a 121, até mesmo com coeficientes de correlação negativos, incoerentes com o que deveria ser observado na prática, já que, quanto maior o nível de irregularidade, maiores acelerações geradas no corpo do veículo.

Figura 117 - Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para o segmento do Aeroporto Estadual de Araraquara, com velocidade operacional de 20 km/h

Figura 118 - Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para o segmento do Aeroporto Estadual de Araraquara, com velocidade operacional de 40 km/h

Figura 119 – Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para o segmento do Aeroporto Estadual de Araraquara, com velocidade operacional de 60 km/h

Figura 120 – Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para o segmento do Aeroporto Estadual de Araraquara, com velocidade operacional de 80 km/h

Figura 121 – Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para o segmento do Aeroporto Estadual de Araraquara, com velocidade operacional de 100 km/h

As Figuras 122 a 124 mostram que o trecho da Embrapa Pecuária Sudeste também alcançou coeficientes de correlação mais baixos que aqueles alcançados na Estrada Municipal Guilherme Scatena, porém maiores que aqueles obtidos no Aeroporto Estadual de Araraquara, quando a comparação é feita para as mesmas velocidades operacionais.

Figura 122 - Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para o segmento da Embrapa Pecuária Sudeste, com velocidade operacional de 20km/h

Figura 123 - Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para o segmento da Embrapa Pecuária Sudeste, com velocidade operacional de 40km/h

Figura 124 – Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para o segmento da Embrapa Pecuária Sudeste, com velocidade operacional de 60km/h

Um dos motivos para a obtenção de coeficientes de correlação menores nesses dois trechos é que a variação do nível de irregularidade ao longo dos 500 metros medidos era menor. No trecho da pista do aeroporto, por exemplo, o nível de irregularidade girou em torno da média

de 1,9 m/km, com o menor valor sendo 1,6 m/km e o maior 2,1 m/km. Com isso, os valores de RMSVA se mantiveram quase constantes ao longo dos 500 metros, nas quais se observava apenas uma leve queda desses valores para o último segmento de 100 metros, que acompanhava o menor índice IRI medido com o Nível e Mira nos últimos 100 metros do trecho, de 1,6 m/km.

No segmento da Embrapa Pecuária Sudeste, como houve uma variação um pouco maior no nível de irregularidade, com uma média de 3,4 m/km, com o menor valor de 2,8 m/km e o maior de 3,7 m/km, houve um aumento nos valores dos coeficientes de correlação em relação ao segmento do Aeroporto Estadual de Araraquara. Além disso, como o nível de irregularidade no segmento da Embrapa Pecuária Sudeste foi um pouco maior que na pista do Aeroporto Estadual de Araraquara, também houve menor influência do ruído os valores de RMSVA.

Mesmo assim, os valores da RMSVA seguiram um padrão, ou seja, variaram de acordo com os diferentes níveis de irregularidade dos pavimentos. Os gráficos das Figuras 125 a 127 mostram a relação entre os valores de IRI calculados a partir dos dados do Nível e Mira e os valores de RMSVA calculados com os dados do smartphone, para as três velocidades operacionais medidas em todos os trechos (20, 40 e 60 km/h), para as subdivisões de 100 metros dos segmentos, com os resultados de todos os trechos medidos e que antes foram plotados separadamente.

Figura 125 – Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para todos os trechos de coleta, com velocidade operacional de 20km/h

Figura 126 - Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para todos os trechos de coleta, com velocidade operacional de 40km/h

Figura 127 - Correlação entre IRI (Nível e Mira) e RMSVA (smartphone), para todos os trechos de coleta, com velocidade operacional de 60km/h

Nota-se que, apesar das correlações entre os valores de RMSVA e os valores de IRI não serem exatas ($R=1$), seguiram uma tendência em uma faixa maior de irregularidade, com melhores resultados para as velocidades de 40 e 60 km/h, como se pode observar pelos maiores valores

de R alcançados e interceptos mais próximos da origem. Por fim, também foram elaborados gráficos de dispersão entre os valores de RMSVA médios para toda a extensão total dos 500 metros dos três trechos medidos e com as velocidades operacionais utilizadas em cada trecho, a fim de avaliar em qual proporção a variável independente Velocidade (V) pode explicar a variável dependente RMSVA. Os resultados são apresentados nas Figuras 128 a 130.

Figura 128 – Correlação entre a RMSVA (smartphone) e a velocidade operacional, para a extensão total de 500 metros da Estrada Municipal Guilherme Scatena

Figura 129 – Correlação entre a RMSVA (smartphone) e a velocidade operacional, para a extensão total de 500 metros do Aeroporto Estadual de Araraquara

Figura 130 – Correlação entre a RMSVA (smartphone) e a velocidade operacional, para a extensão total de 500 metros da Embrapa Pecuária Sudeste

Os resultados apresentados nas Figuras 128 a 130 mostram que houve um aumento dos valores de RMSVA com o aumento da velocidade operacional, para todos os segmentos medidos. Entretanto, apesar dos coeficientes de determinação alcançarem altos valores, não se pode afirmar que existe uma relação de proporcionalidade clara entre esses dois fatores. A relação obtida para a Estrada Municipal Guilherme Scatena, trecho de maior irregularidade e para o segmento do Aeroporto Estadual de Araraquara, com menor nível de irregularidade, alcançaram relações aparentemente bem definidas, diferente da via da Embrapa Pecuária Sudeste, com nível de irregularidade intermediário entre os outros dois.

A relação entre velocidade operacional e índice de irregularidade, como no caso do IRI, não é dada de forma simples, por um aumento ou redução contínua da velocidade, mas é complexa e dependente dos comprimentos de onda presentes na estrada, que não seguem um padrão definido de proporcionalidade (DU *et al.*, 2014).

No caso dos medidores do tipo resposta, a relação entre a velocidade operacional e os índices estatísticos obtidos por cada sistema vão depender não só dos espectros dos perfis dos pavimentos medidos em campo, mas também das características particulares do equipamento utilizado, como já mostrado por Gillespie *et al.* (1980), ao citar como exemplo o equipamento

produzido pela *Portland Cement Association* em 1965, o *PCA Road Meter*, e o *Mays Meter*. Explicam que em algumas estradas a sensibilidade do sistema à velocidade operacional é maior do que a de um medidor ideal e em outras estradas é menor.

Pelo fato das estradas se diferenciarem não só pelo nível de irregularidade, mas pelas características espectrais de seus perfis, o sistema de medição por meio de um smartphone, estudado nesta pesquisa, mostrou ter sensibilidades diferentes ao aumento da velocidade para os três segmentos utilizados. Em um cenário ideal, a obtenção de uma relação bem definida entre a velocidade operacional e o RMSVA permitiriam que a velocidade pudesse variar de acordo com a conveniência durante a coleta dos dados, ou seja, de acordo com os obstáculos encontrados na via. Jiménez e Matout (2014), por exemplo, trabalharam com tablets para a coleta de valores de RMSVA relacionados com a irregularidade longitudinal dos pavimentos e propuseram a normalização dos índices pela velocidade operacional. Tal abordagem pode ser aplicada em situações adversas, mas somente para a faixa de velocidades contempladas pela equação de calibração obtida e de acordo com o nível de irregularidade do pavimento.

De maneira geral, tanto pelos resultados obtidos nas correlações entre os valores de RMSVA e o IRI, quanto pelas correlações entre as velocidades operacionais e os valores de RMSVA, destaca-se a importância da calibração de um sistema medidor de irregularidade do tipo resposta a partir de um método de mensuração de referência, como é o caso dos levantamentos realizados por Nível e Mira, com o uso de vários trechos com diferentes níveis de irregularidade e diferentes velocidades operacionais, a fim de aumentar a qualidade da avaliação do nível de irregularidade do pavimento.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS E DESENVOLVIMENTOS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas a partir da análise dos resultados desta pesquisa e de outros estudos incluídos na revisão bibliográfica, assim como sugestões para pesquisas e desenvolvimentos futuros relacionados ao uso de smartphones para avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos.

5.1 CONCLUSÕES

Esta pesquisa analisou o uso de smartphones para a avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos, devido principalmente ao seu baixo custo, facilidade de operação e alta produtividade. Para isso, foram avaliados trechos de pavimentos com diferentes níveis de irregularidade, em cujos segmentos, coletaram-se sinais de aceleração vertical medidos por um smartphone fixado ao painel de um veículo, em diferentes velocidades. Os dados coletados foram utilizados para a obtenção de índices de irregularidade em termos de medidas estatísticas de RMS (*Root Mean Square* – Média Quadrática). Para aferição desses resultados, foi utilizado o método de Nível e Mira no levantamento de perfis de referência para o cálculo do IRI desses mesmos trechos. Os resultados obtidos apontam que os smartphones são capazes de coletar dados relacionados à irregularidade longitudinal dos pavimentos, principalmente para a alimentação de um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) em nível de rede.

Mesmo com a dificuldade em conduzir o veículo na mesma trilha de rodas, com a variação na massa do veículo, com o ruído de sinal gerado pelo sensor do smartphone e falhas na aquisição dos dados pelo aplicativo *AndroSensor*, alcançaram-se resultados satisfatórios com os valores de RMSVA calculados a partir dos sinais de aceleração verticais fornecidos pelo smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, tanto em termos de repetitividade, quanto nas correlações com o IRI calculado a partir dos levantamentos realizados com Nível e Mira.

Os resultados mostraram que os smartphones podem melhorar seu desempenho na avaliação da irregularidade com o aumento da taxa de aquisição dos dados e que esse fator é dependente tanto do modelo de smartphone quanto do software de aquisição de dados. Maiores taxas de aquisição aumentam as chances de se alcançar índices mais precisos e possibilitam o uso de outras abordagens, como a relação da frequência dos sinais de aceleração com a irregularidade

dos longitudinal dos pavimentos e a obtenção de deslocamentos verticais utilizados no cálculo do IRI.

Ressalta-se que a maior limitação do uso do sistema baseado em smartphones investigado nesta pesquisa, assim como nos sistemas medidores de irregularidade do tipo resposta, é a necessidade de calibração do sistema a partir de um método de levantamento de referência, já que os resultados variam de acordo com o modelo do veículo utilizado, velocidade operacional, modelo de smartphone e aplicativo utilizados. Nesta pesquisa, obtiveram-se índices de irregularidade de referência a partir do método de Nível e Mira, o que foi realizado com a participação de no mínimo duas pessoas, uma responsável por direcionar o nível e registrar os dados e outra para segurar a mira na posição adequada. Com um treinamento adequado, foi possível levantar cada trecho em aproximadamente um a dois dias, sendo que cada trecho possuía 500 metros de extensão, onde eram medidas duas trilhas de rodas com espaçamento de 50 cm para cada cota levantada, totalizando aproximadamente 2000 pontos por segmento medido.

A norma de calibração de sistemas medidores de irregularidade do tipo resposta a partir do método de Nível e Mira (DNER-ES 173/86) exige o uso de 20 trechos de calibração (bases) de 320 metros. Considerando o mesmo intervalo de amostragem de 50 cm, mensuração de duas trilhas de rodas para cada trecho e levando-se em conta o tempo despendido para mensuração dos trechos desta pesquisa, estima-se que a calibração desse sistema levaria em torno de um a dois meses para ser finalizada, dependendo das condições de clima, número de equipes disponíveis para esse trabalho, recursos disponíveis, dentre outros fatores.

É importante manter boas práticas de coleta para se evitar a ocorrência de erros comuns a medidores de irregularidade do tipo resposta, como a manutenção dos componentes do sistema: massa do veículo, pressão dos pneus, sistema de suspensão e balanceamento do veículo. O efeito dessas variáveis também podem ser incluídos em estudos futuros, para que esses fatores possam ser explorados como parte do cálculo do IRI, o que pode ser feito com a modelagem do veículo e verificação do processo com a obtenção de perfis de estradas com níveis de irregularidade conhecidos, a fim de calibrar e validar os modelos propostos.

Mesmo com a influência dos fatores não controlados neste trabalho, os resultados indicaram que o uso de smartphones é aceitável para a obtenção de dados relativos à irregularidade longitudinal dos pavimentos, de maneira flexível e com baixo custo de aquisição e operação,

comparado a outros métodos de mensuração tradicionais. O sistema tem potencial para fornecer uma vasta quantidade de informações por meio da coleta de dados por usuários. Essa abordagem poderia contribuir com a alimentação de um SGP, mas ainda exige estudos adicionais para ser aplicada.

Particularmente, no Brasil, o sistema pode ser utilizado para avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos em rodovias administradas por órgãos públicos, a fim de manter uma coleta de dados contínua, com um custo reduzido. Isso permitiria o mapeamento do nível de irregularidade das rodovias de maneira eficaz, principalmente quando associados a um SIG, inclusive em estradas vicinais, nas quais esse controle é menor.

O uso de smartphones também pode complementar a coleta de dados de outros equipamentos, utilizados com menor frequência, como os conhecidos perfilômetros inerciais. O acompanhamento da variação do nível de irregularidade do pavimento permitiria não só um uso racional de equipamentos mais robustos, mas também uma base de comparação para tais instrumentos, tidos como referência. É importante salientar que, apesar dos levantamentos realizados por alguns equipamentos apresentarem ótima repetitividade, não significa que os resultados sejam necessariamente corretos. Esta é a diferença entre precisão e acurácia.

A taxa de aquisição utilizada para coletar os sinais de aceleração dos smartphones é um fator determinante, principalmente quando os mesmos são utilizados para associar a frequência desses sinais com as irregularidades dos pavimentos ou quando são utilizados para calcular os deslocamentos verticais a partir desses sinais, a fim de se obter índices IRI. Isso porque ambas aplicações trabalham com o espectro de frequência dos sinais medidos, os quais podem apresentar erros, com a atenuação das magnitudes dos eventos de altas frequências, podendo ocasionar o efeito do *aliasing* se a taxa de aquisição for menor do que a taxa de Nyquist.

Os smartphones também apresentam falhas no domínio do tempo, como no cálculo dos valores de RMSVA, devido à limitação de sua taxa de aquisição, que pode acarretar na atenuação dos picos dos sinais de aceleração, tanto maior quanto maior a frequência dos eventos a serem medidos. Entretanto, comparada com outras abordagens, tais falhas são menos críticas, por não envolverem o tratamento dos sinais no domínio da frequência. Com isso, os dados brutos não carregam erros que poderiam ser gerados no processamento desses sinais.

Os acelerômetros dos smartphones, instalados em MEMs (*Micro-Electro-Mechanical Systems* - Sistemas Micro-Eleto-Mecânicos), produzem um ruído inerente ao sensor, que faz com que

sejam gerados sinais de aceleração de pequena magnitude, mesmo quando o smartphone está estático. Esse ruído tem maior influência quanto menor a velocidade do veículo durante a coleta dos dados e menor o nível de irregularidade do pavimento. Isso porque nessas duas condições, a ordem de grandeza dos sinais de aceleração medidos se aproxima da amplitude do ruído.

A repetitividade dos valores de RMSVA está em um nível aceitável para a alimentação de um SGP em nível de rede, com coeficientes de variação médios para 10 viagens, por tamanho de trecho e velocidade operacional utilizados nesta pesquisa, na faixa de 3 a 6%. Tais valores de RMSVA apresentaram correlação positiva com o IRI calculado com os dados medidos pelo método de Nível e Mira, quando se consideram todas as faixas de irregularidade longitudinal avaliadas, com maiores coeficientes de correlação (R) para maiores velocidades operacionais.

Por fim, conclui-se que os smartphones se apresentam como uma alternativa viável para a avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos em levantamentos em nível de rede, nos quais a gerência de pavimentos trabalha com informações agregadas, relacionadas a toda a malha viária, auxiliando na tomada de decisões administrativas, como nas atividades de planejamento, programação e orçamento, principalmente devido ao seu baixo custo, fácil operação e alta produtividade, com potencial de melhoria em função do aperfeiçoamento de seus sensores (acelerômetros e GPS) e de seu uso em larga escala.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS E DESENVOLVIMENTOS

A seguir são apresentadas algumas sugestões para futuras pesquisas relacionadas ao uso de smartphones para avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos:

- Utilizar mais trechos rodoviários que incorporem curvas horizontais e verticais, com outros tipos de revestimento e diferentes níveis de irregularidade;
- Utilização de outros modelos de veículos (pequeno, médio e grande porte), inclusive com o acompanhamento dos efeitos da suspensão, massa do sistema, pressão dos pneus e vibrações do motor;
- Uso de outros tipos de suportes veiculares para smartphone, em diferentes posições (eixos x, y e z);
- Testar outros modelos de smartphone;
- Desenvolver aplicativos que forneçam índices de irregularidade como saída direta, de preferência associados a um SIG;

- Comparar índices de irregularidade obtidos pelo smartphone com outros tipos de perfilômetro;
- Analisar outras taxas de aquisição de dados;
- Verificar outras formas de obtenção do índice de irregularidade, seja com dados brutos, como os valores de RMSVA, ou com o cálculo do IRI por meio de outras técnicas de processamento;
- Investigar a obtenção dos índices de irregularidade para maiores extensões de estradas, com diferentes subdivisões dos segmentos (de 10 m em diante);
- Analisar a eficácia desse sistema em ambientes urbanos de baixa velocidade;
- Estudar a abordagem com grande número de usuários, por meio do uso de dados agregados;
- Trabalhar com veículos com sistemas de suspensão mais rígidos, como a utilização de reboques. Neste caso, uma das vantagens seria a reprodutibilidade do sistema. Ou, ainda, com uso de bicicletas. Assim, seria possível avaliar o desempenho dos smartphones com uma menor atenuação da amplitude dos sinais de aceleração vertical coletados;
- Avaliar a possibilidade do uso dos dados gerados pelos smartphones na previsão das categorias de classificação da irregularidade longitudinal dos pavimentos em termos de IRI, em vez de tentar alcançar valores exatos, com subdivisões de três e cinco categorias, como estudado por Belzowski e Ekstrom (2015).

REFERÊNCIAS

ALESSANDRONI, G.; KLOPFENSTEIN L. C.; DELPRIORI S.; DROMEDARI M.; LUCHETTI G.; PAOLINI B. D.; SERAGHITI A.; LATTANZI E.; FRESCHI V.; CARINI A.; BOGLIOLI A. (2014) **Smartroadsense: Collaborative road surface condition monitoring**. International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies, Ubicomm, pp. 210-215. Disponível em: <http://www.researchgate.net/profile/Emanuele_Lattanzi/publication/271700011_SmartRoadSense_Collaborative_Road_Surface_Condition_Monitoring/links/54cf57c70cf24601c0933aaf.pdf>. Acesso em 20/07/2015.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM) **Standard Practice for Calibration of Systems Used for Measuring Vehicular Response to Pavement Roughness**. ASTM E 1448. United States of America – USA, 1992.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM) **Measuring Road Roughness by Static Level Method**. ASTM E 1364. United States of America – USA, 1995.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM) **Standard Guide for Prioritization of Data Needs for Pavement Management**. ASTM E 1777. United States of America - USA, 1996.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM) **Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements**. ASTM E 1926. United States of America – USA, 1998.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM) **Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems**. ASTM E 867. United States of America - USA, 2000.

ANDREJASIC, M. (2008) **MEMS ACCELEROMETERS**. Seminar. University of Ljubljana Faculty for mathematics and physics. Department of physics. Disponível em: <http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2007_2008/MEMS_accelerometers-koncna.pdf>. Acesso em: 02/03/2016.

Android Application, **AndroSensor**, Google Play Store (2012). Disponível em: <<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.fivasim.AndroSensor&hl=en>>. Acesso em 23/06/2015.

Android Developer: **SensorEvent** (2012). Disponível em: <<http://developer.android.com/reference/android/hardware/SensorEvent.html>>. Acesso em: 23/06/2015.

ASTARITA, V.; CARUSO, M. V.; DANIELI, G.; FESTA D. C.; GIOFRÈ, V. P.; IELE, T.; VAIANA, R. (2012) **A mobile application for road surface quality control: UNiquALroad**. Procedia - Social and Behavioral Science, 54, 1135-1144, DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.09.828. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812042905>>. Acesso em: 20/04/2015.

BARELLA, R. M. (2008) **Contribuição para a Avaliação da Irregularidade longitudinal dos pavimentos com Perfilômetros Inerciais**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.

BEEBY S. P.; ENSELL, G.; KRAFT, M.; WHITE, N. (2004) **MEMS mechanical sensors**. Artech house inc., USA, 2004. Disponível em < http://www.beck-shop.de/fachbuch/leseprobe/9781580535366_Excerpt_001.pdf>. Acesso em 02/03/2016.

BELZOWSKI B.; EKSTROM A. (2015) **Evaluating Rodway Surface Rating Technologies**. Technical Report. University of Michigan Transportation Research Institute and the Michigan Department of Transportation. Disponível em: < <http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/111891/103192.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em 04/09/2015.

BESTER, C. J. (2002) **The Effect of Road Roughness on Safety**. 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., U.S.A. Disponível em: <http://www.ltrc.lsu.edu/TRB_82/TRB2003-000774.pdf>. Acesso em: 29/12/2015.

BUTTLAR, W. G.; ISLAM, S. (2012) **Effect of Pavement Roughness on User Costs**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2285, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., p. 47-55.

BUTTLAR, W. G.; ISLAM, S (2014) **Measurement of pavement roughness using an Android-based smartphone application**. Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, Washington D.C., U.S.A.

CAICEDO, B.; MURILLO C. A.; TRISTANCHO J. A. (2003) **Medida perfil longitudinal de un pavimento mediante Navegación inercial**. XIV SIMPÓSIO Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos. Popayán, Colômbia. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228761480_Medida_perfil_longitudinal_de_un_pavimento_mediante_Navegacion_inercial>. Acesso em: 07/01/2016.

CAREY, W. N.; IRICK, P. E. (1960) **The Pavement Serviceability-Performance Concept**. Highway Research Board Bulletin, No 250, USA. p. 40-58.

CHANG, G.; DICK, L.; RASMUSSEN, R. (2006) **FHWA ProVAL User's Guide Version 2.60**. Austin. Disponível em: <http://www.roadprofile.com>. Acesso em: 23/06/2015.

CHATTI, K.; ZAABAR, I. (2012) **Estimating the Effects of Pavement Condition on Vehicle Operating Costs**. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2285, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 47–55.

CHATTI, K.; ZAABAR, I. (2014) **Estimating Vehicle Operating Costs Caused by Pavement Surface Conditions**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2455, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp.63–75.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT (2015) **Pesquisa CNT de Rodovias 2015**: relatório gerencial. CNT, SEST e SENAT. Brasília, DF.

CUNDILL, M. A. (1991) **The MERLIN Low-Cost Road Roughness Measuring Machine**. Research Report 301, Transport and Road Research Laboratory (TRRL), Berkshire, United Kingdom.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Método do Nível e Mira para Calibração de Sistemas Medidores de Irregularidade Tipo Resposta**. DNER-ES 173/86. Ministério dos Transportes, Espírito Santo, 1986.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **Calibração e Controle de Sistemas Medidores de Irregularidade de Superfície de Pavimento (Sistemas Integradores IPR/USP e Maysmeter)**. DNER-PRO 164/94. Ministério dos Transportes, Rio de Janeiro, 1994a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Publicação IPR – 720. Ministério dos Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Gerência de Pavimentos**. Publicação IPR – 745. Ministério dos Transportes. Instituto de Pesquisa Rodoviárias. Rio de Janeiro, 2011.

DEL ROSARIO M. B.; REDMOND S. J.; LOVELL N. H. (2015) **Tracking the Evolution of Smartphone Sensing for Monitoring Human Movement**. Sensors, vol. 15, no. 8, pp. 18901 – 18933. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/s150818901>. Acesso em: 03/08/2015.

DEY S.; ROY, N.; XU, W.; CHOUDHURY, R. R.; NELAKUDITI, S. (2014) **AccelPrint: Imperfections of Accelerometers Make Smartphones Trackable**. Briefing Papers UCAM-CL-TR-696, University of Illinois and University of South Carolina. Disponível em: <http://synrg.csl.illinois.edu/papers/AccelPrint_NDSS14.pdf>. Acesso em: 27/02/2016.

DOUANGPHACHANH, V.; ONEYMA, H. (2013) **Using Smartphones to Estimate Road Pavement Condition**. In International Symposium for Next Generation Infrastructure. Wollongong, Australia. Disponível em: <<http://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1017&context=isngi2013>>. Acesso em: 03/05/2015.

DOUANGPHACHANH, V.; ONEYMA, H. (2014) **Estimation of road roughness condition from smartphones under realistic settings**. In Proceedings of the 13th International Conference on ITS Telecommunications (ITST). 5-7. pp. 433-439. doi:10.1109/ITST.2013.6685585. Disponível em: <<http://www.jwcn.eurasipjournals.com/content/pdf/1687-1499-2014-114.pdf>>. Acesso em: 03/05/2015.

EISENHAUER, J. G. (2003) **Regression through the Origin**. Teaching Statistics. v. 25, n. 3, pp. 76-80. Disponível em: <https://online.stat.psu.edu/~ajw13/stat501/SpecialTopics/Reg_thru_origin.pdf>. Acesso em: 12/05/2016.

ENDO, M. T.; MONTAGNOLI, A. N.; NICOLETTI, R. (2015) **Measurement of Shaft Orbits with Photographic Images and Sub-Sampling Technique**. *Experimental Mechanics*, v. 55, pp. 471-481.

ERIKSSON J.; GIROD, L.; HULL, B.; NEWTON, R.; MADDEN, S.; BALAKRISHNAN, H. (2008) **The pothole patrol: using a mobile sensor network for road surface monitoring**. *Proceedings of the 6th international conference on Mobile systems, applications, and services*, New York - NY, pp. 29-39.

FERNANDES JR., J. L.; BARBOSA, R.E. (2000) **Estimativa das cargas dinâmicas dos veículos rodoviários que atuam sobre os pavimentos e pontes**. *Transportes*, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 32-50.

FERNANDES JR., J. L.; ODA, S.; ZERBINI, L. F. (2011) **Defeitos e Atividades de Manutenção e Reabilitação em Pavimentos Asfálticos**. Apostila. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos, SP.

FORSLOF, L. (2013) **Roadroid: Continuous road condition monitoring with smart phones**. In IRF 17th World Meeting and Exhibition, Riyadh, Saudi Arabia.

GILLESPIE, T. D., SAYERS, M. W., SEGEL, L. (1980) **Calibration of Response-Type Road Roughness Measuring Systems**. NCHRP Report No. 228, 81 p.

GILLESPIE, T. D.; PATERSON, W. D. O.; SAYERS, M.W. (1986) **Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements**. World Bank Technical Paper Number 46, 87 p.

GILLESPIE, T. D. (1992) **Everything You Always Wanted to Know about the IRI, but Were Afraid to Ask!** In: Road Profiler User Group Meeting. Lincoln.

HAAS, R.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. (1994) **Modern Pavement Management**. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida.

HANSON, T. R.; CAMERON, C. (2012) **Can a smartphone collect IRI data?** Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada – Transportation: Innovations and Opportunities Fredericton, NB, Canada. Disponível em: <<http://conf.tac-atc.ca/english/annualconference/tac2012/docs/session29/hanson.pdf>>. Acesso em 20/04/2015.

HANSON, T.; CAMERON, C.; HILDEBRAND, E. (2014) **Evaluation of low-cost consumer-level mobile phone technology for measuring international roughness index (IRI) values**. *Canadian Journal of Civil Engineering*. pp. 819-827. doi:10.1139/cjce-2014-0183.

HEGMON, R. R. (1992) **Some Results from Ongoing Research on Road Roughness**. Vehicle, Tyre, Pavement Interface ASTM STP 1164.

HVEEM, F. N. (1960) **Devices for Recording and Evaluating Pavement Roughness**. Highway Research Board Bulletin, 264, 1-26.

INGLE K. V.; PROAKIS G. J. (1997) **Digital Signal Processing Using Matlab V4**. PWS Publishing Company.

JIMÉNEZ L. A.; MATOUT N. (2014) **A low cost solution to assess road's roughness surface condition for Pavement Management**. Revista Global de Negócios (RGN) del Institute for Business and Finance Research. TRB 2014 Annual Meeting. Proceedings of the 93th Annual meeting of the Transportation Research Board of the National Academies, n.3086, Washington, D.C., pp.1-16. Disponível em: <<http://docs.trb.org/prp/14-3086.pdf>>. Acesso em 04/09/2015.

KARAMIHAS, S. M.; GILLESPIE, T. D.; PERERA, R. W.; KOHN, S. D. (1999) **Guidelines for Longitudinal Pavement Profile Measurement**. National Cooperative Highway Research Program – NCHRP 434. Whashington, D. C., TRB, NCHRP.

MINH DO T.; CHI LE T. (2013) **Performance Analysis of FFT Filter to Measure Displacement Signal in Road Roughness Profiler**. International Conference on Electronics Engineering and Technology, Bangkok, Thailand, 8-9April. Disponível em: <<http://www.ijcee.org/papers/731-ET0006.pdf>>. Acesso em: 24/07/2015.

MORAES, J. L.; BESSA, J. A.; NETO, E. C.; MOURA, L. B.; ALEXANDRIA, A. R. de (2014) **Sistema de aquisição de dados para a máquina de impacto Charpy**. Holos (Natal Online). v. 4, pp. 1-18, issn: 18071600. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/2008>>. Acesso em: 20/09/2015.

MORROW, G.; FRANCIS, A.; COSTELLO, S. B.; DUNN, R. C. M. (2006) **Comparison of Roughness Calibration Equipment - with a View to Increased Confidence in Network Level Data**. Institute of Transportation Engineers Annual Meeting and Exhibit 2005, Victoria, Australia, 7-10 August. v. 1, pp. 843-856, isbn: 9781622761869. Disponível em: <<http://www.lpcb.org/index.php/documents/data-collection/roughness/11127-2006-nz-comparison-of-roughness-calibration-equipment-with-a-view-to-increased-confidence-in-network-level-data/file>>. Acesso em: 14/04/2015.

NAMUR, E.; SOLMINIHAC, H. de. (2009) **Roughness of Unpaved Roughness: Estimation and Use as an Intervention Threshold**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2101, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 10–16.

NETO, J. F. (1999) **Aplicação da Transformada de Fourier no Processamento Digital de Imagens**. Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Aracajú – SE. Disponível em: <<http://www.cin.ufpe.br/~ags/Sinais/Aplica%E7%E3o%20da%20Transformada%20de%20Fourier%20no%20processamento%20digital%20de%20imagens.pdf>>. Acesso em: 03/02/2016.

PHOENIX SCIENTIFIC INC. (2004) **Pavement Profile Scanner (PPS) White Paper**. Disponível em: <[http://www.phnx-sci.com/PPS/Downloads_files/PPS%20Technology%20\(2004\).pdf](http://www.phnx-sci.com/PPS/Downloads_files/PPS%20Technology%20(2004).pdf)>. Acesso em 10/01/2016.

QUEIROZ, C. A. V. (1981) **A Procedure for Obtaining a Stable Roughness Scale from Rod and Level Profiles**. Working Document 22, Research on Interrelationships between Costs of Highway Construction, Maintenance, and Utilization. GEIPOT, Brazil.

RIBEIRO, J.G.; FREIRE, J.L.; de CASTRO, J.T. (2003) **New Improvements in the Digital Double Integration Filtering Method to Measure Displacements using Accelerometers**. Proceedings of the International Modal Analysis Conference – IMAC, v 1, pp. 538-542. Disponível em: <<http://sem-proceedings.com/19i/sem.org-IMAC-XIX-191602-New-Improvements-Digital-Double-Integration-Filtering-Method-Measure.pdf>>. Acesso em: 30/09/2015.

SAUEREWIN, P. M.; SMITH B. L. (2011) **Investigation of the Implementation of a Probe-Vehicle Based Pavement Roughness Estimation System**. Mid-Atlantic Universities Transportation Center, University Park, Pa.

SAYERS, M. W. (1990) **Profiles of Roughness**. Transportation Research Record, No. 1260, pp. 06–111.

SAYERS, M. W.; KARAMIHAS, S. M. (1998) **The little book of profiling**. Ann Arbor: Transportation Research Institute, University of Michigan, USA. Disponível em: <<http://www.umtri.umich.edu/content/LittleBook98R>>. Acesso em 10/05/2015.

SCHLOTJES, M. R.; VISSER, A.; BENNET, C. (2014) **Evaluation of a smart phone roughness meter**. University of Pretoria. Disponível em: <http://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/45571/Visser_Evaluation_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 05/07/2015.

SILVA, L. L.; RODRIGUES J. R.; CAZO, R. M.; CARVALHO, M. M.; PASSARO, A.; ALMEIDA V. R. (2015) **Caracterização de Erros Sistemáticos em um Acelerômetro Micro-Eleto-Mecânico Capacitivo**. VIII Simpósio Brasileiro de Engenharia Inercial - SBEIN, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, Brasil.

SLIFKA L. D. (2004) **An accelerometer based approach to measuring displacement of a vehicle body**. M.S. thesis, Dept. Elect. Comput. Eng., Michigan Univ., USA, 2004. Disponível em: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:oQ68t_oUi-wJ:www-personal.engin.umd.umich.edu/~jwvm/current/Lance/LSlifkaThesis.doc+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>. Acesso em: 30/09/2015.

STRAZDINS G.; MEDNIS, A.; KANONIRS, G.; ZVIEDRIS R.; SELAVO, L. (2011) **Towards vehicular sensor networks with *android* smartphones for road surface monitoring**. 2nd International Workshop on Networks of Cooperating Objects, Electronic Proceedings of CPS Week, vol. 11. Disponível em: <<http://strazdins.lv/papers/strazdins2011androidpotholes.pdf>>. Acesso em: 20/09/2015.

TAI Y.; CHAN C.; HSU Y. J. (2010) **Automatic Road Anomaly Detection Using Smart Mobile Device**. In Proceedings of the 2010 Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI 2010), Hsinchu, Taiwan, pp. 1-8. Disponível em: <http://w.csie.org/~yctai/papers/taai2010_paper.pdf>. Acesso em: 20/04/2015.

DU, Y.; LIU C.; WU D.; JIANG, S. (2014) **Measurement of International Roughness Index by Using Z-Axis Accelerometers and GPS**. Mathematical Problems in Engineering. Vol I. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji

University, Shanghai 201804, China. Disponível em:
<http://dx.doi.org/10.1155/2014/928980>>. Acesso em 23/07/2015.

ZAWISTOWSKI, T.; SHAH, P. (2010) **An Introduction to Sampling Theory**. Disponível em: <http://www2.egr.uh.edu/~glover/applets/Sampling/Sampling.html>>. Acesso em 12/05/2016.

ZANIEWSKI, J. P.; BUTLER, B. C.; CUNNINGHAM, G.; ELKINS, G. E.; PAGGI, M. S.; MACHEMEHL, R. (1982) **Vehicle Operating Costs, Fuel Consumption, and Pavement Type and Condition Factors**. Report FHWA-PL-82-001. FHWA, U.S. Department of Transportation.

ZENG, H.; SMITH B. L.; PARK. H.; PARKANY E. (2014) **A Connected Vehicle-Based Application to Estimate Road Roughness Transportation agencies devote significant resources towards collection of highly detailed**. Poster presented in Connected Vehicle Infrastructure University Transportation Center – CVI UTC. Center for Transportation Studies - University of Virginia. Virginia, USA.

APÊNDICE A - Ensaios de vibração com uso do aplicativo *AndroSensor* em diferentes smartphones, diferentes amplitudes e diferentes frequências de oscilação

Resultados dos testes de vibração para o smartphone Samsung Galaxy Mini S5, com amplitude de aproximadamente 2 m/s^2 .

Resultados dos testes de vibração para o smartphone Samsung Galaxy Mini S5, com amplitude de aproximadamente 6 m/s^2 .

Resultados dos testes de vibração para o smartphone Samsung Galaxy Mini S5, com amplitude de aproximadamente 10 m/s².

Resultados dos testes de vibração para o smartphone Motorola Moto X Play, com amplitude de aproximadamente 2 m/s^2 .

Resultados dos testes de vibração para o smartphone Motorola Moto X Play, com amplitude de aproximadamente 6 m/s².

Resultados dos testes de vibração para o smartphone Motorola Moto X Play, com amplitude de aproximadamente 10 m/s^2 .

Resultados dos testes de vibração para o smartphone Sony Xperia SP, com amplitude de aproximadamente 2 m/s^2 .

Resultados dos testes de vibração para o smartphone Sony Xperia SP, com amplitude de aproximadamente 6 m/s^2 .

Resultados dos testes de vibração para o smartphone Sony Xperia SP, com amplitude de aproximadamente 10 m/s².

APÊNDICE B - Ensaios de vibração com uso do aplicativo *Accelerometer Analyser* em diferentes smartphones, diferentes amplitudes e diferentes frequências de oscilação

Resultados dos testes de vibração para o smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, com amplitude de aproximadamente 2 m/s².

Resultados dos testes de vibração para o smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, com amplitude de aproximadamente 4 m/s^2 .

Resultados dos testes de vibração para o smartphone Samsung Galaxy S5 Mini, com amplitude de aproximadamente 10 m/s².

Resultados dos testes de vibração para o smartphone Motorola Moto X Play, com amplitude de aproximadamente 2 m/s^2 .

Resultados dos testes de vibração para o smartphone Motorola Moto X Play, com amplitude de aproximadamente 4 m/s^2 .

Resultados dos testes de vibração para o smartphone Motorola Moto X Play, com amplitude de aproximadamente 10 m/s².

Resultados dos testes de vibração para o smartphone Sony Xperia SP, com amplitude de aproximadamente 2 m/s^2 .

Resultados dos testes de vibração para o smartphone Sony Xperia SP, com amplitude de aproximadamente 4 m/s².

Resultados dos testes de vibração para o smartphone Sony Xperia SP, com amplitude de aproximadamente 10 m/s^2 .

Resultados dos testes de vibração para o smartphone Sony Xperia SP, com uso simultâneo do aplicativo *Endomondo*, que coleta dados do GPS do aparelho, com amplitudes de aproximadamente 2, 4 e 10 m/s², respectivamente.

APÊNDICE C – Valores obtidos para o cálculo do RMSVA médios em diferentes trechos e com diferentes velocidades operacionais

As Tabelas 11 a 13 apresentam os valores obtidos para o cálculo do RMSVA médios da Estrada Municipal Guilherme Scatena.

Tabela 10 – Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 20 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMSVA Médio (m/s ²)	σ	CV (%)
0 - 100	1,12	1,18	1,16	1,17	1,19	1,15	1,13	1,22	1,14	1,15	1,16	0,03	2,62
100 - 200	1,21	1,34	1,31	1,23	1,33	1,29	1,40	1,32	1,15	1,26	1,28	0,07	5,65
200 - 300	1,62	1,66	1,73	1,65	1,55	1,54	1,66	1,70	1,58	1,52	1,62	0,07	4,45
300 - 400	1,36	1,56	1,43	1,54	1,50	1,48	1,43	1,59	1,60	1,59	1,51	0,08	5,45
400 - 500	1,09	1,18	1,19	1,18	1,13	1,15	1,15	1,23	1,14	1,22	1,17	0,04	3,74

Tabela 11 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 40 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMSVA Médio (m/s ²)	σ	CV (%)
0 - 100	2,11	2,29	2,28	2,43	2,31	2,45	2,35	2,34	2,18	2,50	2,32	0,12	5,16
100 - 200	2,75	2,56	2,56	2,72	2,82	2,93	2,65	2,94	2,72	2,63	2,73	0,14	5,03
200 - 300	3,53	3,28	3,45	3,79	3,74	3,75	3,66	3,64	3,73	3,72	3,63	0,16	4,45
300 - 400	2,87	2,98	2,96	3,34	2,91	3,16	3,16	3,19	3,25	3,26	3,11	0,16	5,28
400 - 500	1,99	2,10	2,01	2,09	2,35	1,94	2,13	2,23	1,94	2,12	2,09	0,13	6,20

Tabela 12 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 60 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMSVA Médio (m/s ²)	σ	CV (%)
0 - 100	4,06	4,01	4,41	3,75	3,82	3,78	4,18	4,33	3,96	3,74	4,00	0,24	6,04
100 - 200	4,30	4,34	4,06	4,91	4,41	4,46	4,41	4,21	3,95	4,47	4,35	0,26	5,96
200 - 300	7,10	6,25	7,19	6,82	6,99	6,59	6,35	6,28	6,12	7,02	6,67	0,40	6,01
300 - 400	5,42	4,98	5,38	5,42	5,22	5,10	4,96	5,63	5,18	5,60	5,29	0,24	4,49
400 - 500	3,73	3,67	3,28	3,23	3,34	3,63	3,52	3,37	3,22	3,20	3,42	0,20	5,89

As Tabelas 14 a 18 apresentam os valores obtidos para o cálculo do RMSVA médios do Aeroporto Estadual de Araraquara.

Tabela 13 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 20 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMSVA Médio (m/s ²)	σ	CV (%)
0 - 100	0,40	0,41	0,41	0,40	0,41	0,38	0,40	0,37	0,37	0,36	0,39	0,02	4,71
100 - 200	0,39	0,39	0,39	0,36	0,40	0,37	0,39	0,37	0,35	0,35	0,38	0,02	4,72
200 - 300	0,35	0,40	0,39	0,38	0,38	0,37	0,37	0,37	0,35	0,35	0,37	0,02	4,30
300 - 400	0,38	0,38	0,37	0,34	0,38	0,34	0,35	0,35	0,35	0,36	0,36	0,02	4,67
400 - 500	0,38	0,38	0,34	0,34	0,37	0,35	0,36	0,34	0,35	0,37	0,36	0,02	4,40

Tabela 14 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 40 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMSVA Médio (m/s ²)	σ	CV (%)
0 - 100	0,68	0,65	0,61	0,68	0,62	0,64	0,67	0,66	0,63	0,70	0,65	0,03	4,26
100 - 200	0,57	0,59	0,54	0,59	0,59	0,60	0,61	0,63	0,60	0,62	0,59	0,03	4,46
200 - 300	0,59	0,61	0,59	0,61	0,61	0,54	0,60	0,68	0,62	0,66	0,61	0,04	6,16
300 - 400	0,53	0,56	0,53	0,56	0,56	0,53	0,57	0,58	0,54	0,58	0,55	0,02	3,60
400 - 500	0,53	0,54	0,57	0,59	0,58	0,54	0,57	0,56	0,54	0,61	0,56	0,03	4,53

Tabela 15 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 60 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMSVA Médio (m/s ²)	σ	CV (%)
0 - 100	0,81	0,80	0,87	0,73	0,82	0,80	0,84	0,73	0,85	0,75	0,80	0,05	5,99
100 - 200	0,79	0,81	0,84	0,83	0,79	0,89	0,82	0,83	0,86	0,76	0,82	0,04	4,49
200 - 300	0,86	0,79	0,73	0,83	0,88	0,86	0,82	0,83	0,80	0,75	0,81	0,05	5,81
300 - 400	0,76	0,75	0,67	0,77	0,78	0,77	0,75	0,77	0,70	0,68	0,74	0,04	5,52
400 - 500	0,67	0,71	0,76	0,65	0,68	0,72	0,70	0,70	0,74	0,73	0,71	0,03	4,67

Tabela 16 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 80 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMSVA Médio (m/s ²)	σ	CV (%)
0 - 100	1,05	0,98	1,01	0,94	1,02	1,01	1,06	1,00	1,09	1,03	1,02	0,04	4,15
100 - 200	1,06	1,06	0,96	0,97	0,87	0,91	0,99	1,09	0,97	1,11	1,00	0,08	7,88
200 - 300	0,97	0,98	1,01	1,09	0,99	0,85	1,16	0,97	0,95	1,14	1,01	0,09	9,26
300 - 400	0,96	0,95	0,98	1,03	0,98	0,88	0,95	0,98	1,04	1,00	0,97	0,05	4,74
400 - 500	0,88	0,91	0,86	0,93	0,96	0,96	0,91	0,98	0,98	0,99	0,94	0,05	4,84

Tabela 17 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 100 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMSVA Médio (m/s ²)	σ	CV (%)
0 - 100	1,19	1,03	1,04	1,05	1,20	1,09	1,14	1,14	1,14	1,10	1,11	0,06	5,41
100 - 200	1,11	1,00	1,12	1,01	0,97	1,17	0,96	1,07	1,12	1,09	1,06	0,07	6,78
200 - 300	1,04	0,95	1,07	1,07	1,09	1,05	1,03	1,14	1,07	1,01	1,05	0,05	4,74
300 - 400	1,13	1,02	0,99	0,92	1,08	1,09	1,03	1,02	1,03	1,03	1,03	0,06	5,41
400 - 500	1,10	0,94	0,99	0,97	0,91	0,91	0,95	1,03	1,03	1,03	0,99	0,06	6,36

As Tabelas 19 a 21 apresentam os valores obtidos para o cálculo do RMSVA médios da Embrapa Pecuária Sudeste.

Tabela 18 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 20 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMSVA Médio (m/s ²)	σ	CV (%)
0 - 100	0,76	0,76	0,73	0,75	0,72	0,77	0,75	0,72	0,77	0,68	0,74	0,03	3,79
100 - 200	0,78	0,74	0,77	0,77	0,73	0,76	0,72	0,74	0,78	0,72	0,75	0,02	3,19
200 - 300	0,83	0,77	0,79	0,77	0,72	0,78	0,79	0,78	0,76	0,73	0,77	0,03	4,09
300 - 400	0,78	0,77	0,76	0,78	0,75	0,78	0,76	0,78	0,76	0,73	0,76	0,02	1,97
400 - 500	0,87	0,77	0,83	0,78	0,83	0,82	0,79	0,80	0,78	0,79	0,80	0,03	4,00

Tabela 19 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 40 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMSVA Médio (m/s ²)	σ	CV (%)
0 - 100	1,02	1,01	1,08	1,07	1,07	1,06	1,05	1,04	1,08	1,12	1,06	0,03	3,23
100 - 200	1,05	1,06	1,15	1,10	1,07	1,12	1,13	1,02	1,14	1,06	1,09	0,05	4,14
200 - 300	1,16	1,08	1,10	1,17	1,16	1,11	1,14	1,10	1,17	1,12	1,13	0,03	2,94
300 - 400	1,13	1,06	1,14	1,05	1,13	1,14	1,16	1,06	1,08	1,08	1,10	0,04	3,62
400 - 500	1,14	1,20	1,27	1,22	1,29	1,24	1,30	1,21	1,27	1,24	1,24	0,05	3,85

Tabela 20 - Valores de RMSVA médios: Velocidade Operacional = 60 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMSVA Médio (m/s ²)	σ	CV (%)
0 - 100	1,17	1,12	1,07	1,08	1,05	1,09	1,08	1,11	1,08	1,01	1,09	0,04	3,94
100 - 200	1,23	1,14	1,08	1,15	1,24	1,15	1,11	1,19	1,19	1,18	1,17	0,05	4,29
200 - 300	1,28	1,24	1,19	1,19	1,19	1,24	1,24	1,26	1,29	1,26	1,24	0,04	2,94
300 - 400	1,17	1,08	1,05	1,14	1,16	1,03	1,09	1,06	1,05	1,21	1,10	0,06	5,52
400 - 500	1,44	1,33	1,36	1,34	1,45	1,32	1,43	1,40	1,50	1,44	1,40	0,06	4,26

ANEXO A

Especificações do acelerômetro piezoelétrico utilizado nos testes de vibração. Detalhes sobre o *Shaker* podem ser obtidas no documento técnico no link: <<http://www.bksv.com/doc/be0194.pdf>>. Detalhes sobre o amplificador podem ser obtidas em um documento técnico pelo link: <http://doc.es.aau.dk/fileadmin/doc.kom.aau.dk/labs_facillities/control/manuals/Bruel-Kjaer-2712.pdf>.

Piezoelectric Accelerometer Charge Accelerometer — Type 4383, 4383 S and 4383 V

USES

- General purpose
- High sensitivity
- Low-level, low-frequency measurement
- Vibration testing and analysis

Description

Type 4383 is a piezoelectric, DeltaShear®, Unigain® accelerometer with side connector. Type 4383 features 10–32 UNF receptacle for output connection and can be mounted on the object by means of a 10–32 UNF threaded steel stud.

Calibration

The sensitivity given in the calibration chart has been measured at 159.2 Hz and an acceleration of 10 g. For 99.9% confidence level, the accuracy of the factory calibration is $\pm 2\%$.

Characteristics

This piezoelectric accelerometer may be treated as a charge source. Its sensitivity is expressed in terms of charge per unit acceleration (pC/g).

The DeltaShear design involves three piezoelectric elements and three masses arranged in a triangular configuration around a triangular centre post. The ring prestresses the piezoelectric elements to give a high degree of linearity. The charge is collected between the housing and the clamping ring. The piezoelectric element used is a PZ 23 lead zirconate titanate element. The housing material is titanium.

Specifications – Charge Accelerometer Type 4383, 4383 S and 4383 V

	Units	4383/4383 S	4383 V
Dynamic Characteristics			
Charge Sensitivity (@ 159.2 Hz)	pC/g	31 ± 2%	31 ± 15%
Frequency Response		See typical Amplitude Response	
Mounted Resonance Frequency	kHz	28	
Amplitude Response ±10% [1]	Hz	0.1 to 8400	
Transverse Sensitivity	%	<4	
Transverse Resonance Frequency	kHz	10	
Electrical Characteristics			
Min. Leakage Resistance @ 20°C	GΩ	20	
Capacitance	pF	1200	
Grounding		Signal ground connected to case	
Environmental Characteristics			
Temperature Range	°C (°F)	-74 to 250 (-101 to 482)	
Humidity		Welded, sealed	
Max. Operational Sinusoidal Vibration (peak)	g pk	2000	
Max. Operational Shock (± peak)	g pk	5000	
Base Strain Sensitivity	Equiv. g/μ strain	0.001	
Thermal Transient Sensitivity	Equiv. g/°C (g/°F)	0.01 (0.0056)	
Magnetic Sensitivity (50 Hz-0.03 Tesla)	g/T	0.3	
Physical Characteristics			
Dimensions		See outline drawing	
Weight	gram (oz.)	17 (0.6)	
Case Material		Titanium	
Connector		10-32 UNF-2A	
Mounting		10-32 UNF-2A × 4 mm threaded hole	

[1] Low-end response of the transducer is a function of its associated electronics

Ordering Information

Type 4383 includes the following accessories:

- Carrying box
- Calibration chart
- AO 0038: Low noise cable fitted with 10–32 connectors, 1.2 m
- 10–32 UNF threaded steel stud. Length 12.7 mm

Type 4383 S includes the following accessories:

- Carrying box
- Calibration chart
- AO 0038: Low noise cable fitted with 10–32 connectors, 1.2 m
- 10–32 UNF threaded steel stud. Length 12.7 mm
- UA 0078: Accessory box including:
 - Cementing stud, 10–32 UNF
 - EP610 input adaptor, TNC to 10–32 UNF microdot
 - Mounting magnet, 10–32 UNF thread
 - Case of beeswax

- Insulating disk
- Insulating stud
- Steel stud 10–32 UNF × ½"
- Tools

Type 4383 V includes the following accessories:

- Carrying box
- Calibration chart
- 10–32 UNF threaded steel stud. Length 12.7 mm

OPTIONAL ACCESSORIES

- AO 0038: 260°C Teflon® low-noise cable, 10–32 UNF, length 1.2 m (4 ft)
- AO 0122: 250°C, reinforced super low noise cable, 10–32, 3 m (10 ft)
- AO 0231: 260°C Teflon low-noise cable, 10–32 UNF/TNC, length 3 m (10 ft)
- AO 1382: Teflon low noise cable, double screened 10–32, 1.2 m (4 ft)
- DB 0544: 10–32 UNF Round tip

- JJ 0207: 2-pin TNC/10–32 UNF plug adaptor
- JP 0162: 10–32 UNF to TNC connector adaptor
- QA 0013: Hexagonal key for 10–32 UNF studs
- QA 0029: Tap for 10–32 UNF thread
- UA 0559: Mechanical filter for Accelerometer
- UA 0642: Mounting magnet and 2 insulating discs
- UA 0866: Cement stud 10–32 UNF 0.14 mm (set of 25)
- YG 0150: Steel stud 10–32/10–32 with flange
- YJ 0216: Beeswax for mounting
- YP 0080: Probe with sharp tip
- YP 0150: 10–32 UNF insulated stud. Length 12.7 mm
- YQ 2960: 0–32 UNF threaded steel stud. Length 12.7 mm
- YQ 2962: 0–32 UNF threaded steel stud. Length 7.62 mm

Brüel & Kjær reserves the right to change specifications and accessories without notice

HEADQUARTERS: DK-2850 Nærum · Denmark · Telephone: +45 4580 0500
Fax: +45 4580 1405 · www.bksv.com · info@bksv.com

Australia (+61) 2 9889 8888 · Austria (+43) 1 865 74 00 · Brazil (+55) 11 5188 8166
Canada (+1) 514 895 8225 · China (+86) 10 680 29908 · Czech Republic (+420) 2 6702 1100
Finland (+358) 9 755 950 · France (+33) 1 69 90 71 00 · Germany (+49) 421 17 87 0
Hong Kong (+852) 2548 7486 · Hungary (+36) 1 215 83 05 · Ireland (+353) 1 807 4083
Italy (+39) 0257 68061 · Japan (+81) 3 3779 8671 · Republic of Korea (+82) 2 3473 0605
Netherlands (+31) 318 55 9290 · Norway (+47) 66 77 11 55 · Poland (+48) 22 816 75 56
Portugal (+351) 21 47 11 4 53 · Singapore (+65) 377 4512 · Slovak Republic (+421) 25 443 0701
Spain (+34) 91 659 0820 · Sweden (+46) 8 449 8800 · Switzerland (+41) 1 880 70 35
Taiwan (+886) 2 2502 7255 · United Kingdom (+44) 14 38 739 000 · USA (+1) 800 332 2040

Local representatives and service organisations worldwide

Brüel & Kjær

ANEXO B

As Figuras 131 e 132 apresentam o esquema e a foto do filtro físico utilizado na aquisição de dados pelo acelerômetro piezoresistivo.

Figura 131 – Esquema do filtro utilizado para aquisição de dados com o acelerômetro piezoresistivo

Figura 132 - Imagem do sistema de aquisição de dados montado para coleta dos perfis coletados em campo

ANEXO C

Especificações do acelerômetro piezoresistivo utilizado nas coletas de campo.

Endevco

Model 7265A/A-HS Piezoresistive accelerometer

Features

- Small size
- 20 and 100 g full scale
- Damped
- DC response
- Motion studies

Description

The Endevco® model 7265A series, with sensitivity up to 25 mV/g, is a family of very low mass (6 gram), piezoresistive accelerometers designed for flutter testing, biomedical motion studies, and similar applications requiring high sensitivity, good low frequency response and minimum mass loading.

The model 7265A series has viscous damping to extend the useful high frequency range and to reduce the effects of spurious high frequency excitation. Mechanical stops prevent damage when the transducer is subjected to overrange shock. The model 7265A series utilizes two of Endevco's PIEZITE® P-11 silicon gages and two fixed resistors in a full-bridge circuit. This configuration provides a low impedance output of 500 mV full scale with 10 Vdc excitation.

The model 7265A has a sensitivity of 5 mV/g and a full scale of 100 g. The model 7265A-HS (high sensitivity) has a very high sensitivity of 25 mV/g with a full scale of 20 g. Endevco model 136 three-channel system, model 4430A or OASIS 2000 computer-controlled system are recommended as signal conditioner and power supply.

Model 7265A/A-HS Piezoresistive accelerometer

Endevco

Specifications

	Units	7265A	7265A-HS
Range	g pk	±100	±20
Sensitivity [at 100 Hz]	mV/g typ (Min)	5 (3.75)	25 (20)
Amplitude response [1]			
±5%	Hz	0 to 800	0 to 500
Mounted resonance frequency [1]	Hz	2700	1400
Damping ratio [2]		0.707	0.707
Non-linearity and hysteresis			
[% of reading, to full range]	% Max	±2	±2
Transverse sensitivity	% Max	5	5
Zero measurand output [3]	mV Max	±50	±50
Thermal zero shift			
from 0 to 150°F (-18°C to +66°C)	mV Max	±25	±25
Thermal sensitivity shift			
from 0 to 150°F (-18°C to +66°C)	% Typ	-5	-5
Warm-up time	Minutes max	2	2

Electrical

Excitation [4] [5]	10.0 Vdc, 15 Vdc maximum
Input resistance [4] [6]	750 ohms
Output resistance [4] [6]	900 ohms
Fixed resistors	500 ohms ±1%
Insulation resistance	100 megohms minimum at 100 Vdc; between sensors, cable shield and housing

Physical

Case, material	Anodized aluminum alloy
Electrical, connections	Integral cable, four conductor No. 32 AWG, Teflon® insulated leads, braided shield, silicone jacket
Identification	Manufacturer's logo, model number and serial number
Mounting/torque	Slots for two 2-56 mounting screws / 5 lbf-in (0.6 Nm)
Weight	grams 5 5.9

Environmental

Acceleration limits [in any direction] [7]			
Static	g	2000	2000
Sinusoidal vibration	g pk	1000	200
Shock [half-sine pulse]	g	2000	2000
Temperature			
Operating	0°F to 150°F (-18°C to +66°C)		
Storage	-65°F to +185°F (-54°C to +85°C)		
Humidity	Unaffected. Hermetically sealed		
Altitude	Unaffected		

Calibration data supplied

Sensitivity [at 100 Hz and 10 g pk]	mV/g
Frequency response	20 Hz to 1000 Hz, % deviation reference 100 Hz
Zero measurand output	mV
Maximum transverse sensitivity	% of sensitivity
Mounted resonance frequency	Hz
Input and output resistance	Ohms

Notes:

- Frequency response is ±5%, typical, over entire operating temperature range, 0 Hz to 200 Hz for model 7265A and 0 Hz to 125 Hz for model 7265A-HS. The sensitivity increase at the mounted resonant frequency is less than 10%, reference 100 Hz.
- Damping ratio is 2.1/0.3, typical, at 0°F/150°F (-18°C/+66°C).
- Zero Measurand Output (ZMO) is the transducer output with 0 acceleration applied.
- Rated excitation is 10.0 Vdc. The strain gage elements have a positive temperature coefficient of resistance of approximately 0.5% per °F. Power supply current regulating capability should be carefully considered when operating at low temperature extremes, especially when exciting more than one transducer from a single supply.
- Other excitation voltages may be used to 15.0 Vdc. Specify at time of order to obtain a more accurate calibration.
- Measured at approximately 1 Vdc. Bridge resistance increases with applied voltage due to heat dissipation in the strain gage elements.
- The safety sleeve should be kept on the unit when not in use to prevent possible handling damage.
- Maintain high levels of precision and accuracy using Endevco's factory calibration services. Call Endevco's inside sales force at 800-982-6732 for recommended intervals, pricing and turn around time for these services as well as for quotations on our standard products.

NOTE: Tighter specifications available on special order.

Accessories

EHM178	Allen wrench
EHW200	[2] size-2 flat washers
EH3	[2] 2-56 x 1/4 inch socket head cap screws

Optional accessories

24328	4 conductor shielded cable
7955	Triaxial mounting block

Continued product improvement necessitates that Endevco reserve the right to modify these specifications without notice. Endevco maintains a program of constant surveillance over all products to ensure a high level of reliability. This program includes attention to reliability factors during product design, the support of stringent Quality Control requirements, and compulsory corrective action procedures. These measures, together with conservative specifications have made the name Endevco synonymous with reliability.

© ENDEVCO CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED 30700 RANCHO VIEJO ROAD, SAN JUAN CAPISTRANO, CA 92675 USA
(800) 982-6732 • (949) 675-6181 fax (949) 641-7231 • www.endevco.com • Email: applications@endevco.com

052009

MEGGITT
smart engineering for
extreme environments

ANEXO D

Especificações da placa de aquisição utilizada com o acelerômetro piezoresistivo.

DEVICE SPECIFICATIONS

NI USB-6009

Bus-Powered Multifunction DAQ USB Device

The following specifications are typical at 25 °C, unless otherwise noted. For more information about the NI USB-6009, refer to the *NI USB-6008/6009 User Guide* available from ni.com/manuals.

Analog Input

Analog inputs	
Differential	4
Single-ended	8, software-selectable
Input resolution	
Differential	14 bits
Single-ended	13 bits
Maximum sample rate (aggregate)	48 kS/s, system dependent
Converter type	Successive approximation
AI FIFO	512 bytes
Timing resolution	41.67 ns (24 MHz timebase)
Timing accuracy	100 ppm of actual sample rate
Input range	
Differential	$\pm 20\text{ V}^1$, $\pm 10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 4\text{ V}$, $\pm 2.5\text{ V}$, $\pm 2\text{ V}$, $\pm 1.25\text{ V}$, $\pm 1\text{ V}$
Single-ended	$\pm 10\text{ V}$
Working voltage	$\pm 10\text{ V}$
Input impedance	144 k Ω

¹ $\pm 20\text{ V}$ means that $|AI+ - (AI-)| \leq 20\text{ V}$. However, AI+ and AI- must both be within $\pm 10\text{ V}$ of GND. Refer to the *Taking Differential Measurements* section of the *NI USB-6008/6009 User Guide* for more information.

Overvoltage protection	± 35 V
Trigger source	Software or external digital trigger
System noise ²	
Differential	
± 20 V range	5 mV _{rms}
± 1 V range	0.5 mV _{rms}
Single-ended, ± 10 V range	5 mV _{rms}

Table 1. Absolute Accuracy at Full Scale, Differential

Range (V)	Typical at 25 °C (mV)	Maximum over Temperature (mV)
± 20	14.7	138
± 10	7.73	84.8
± 5	4.28	58.4
± 4	3.59	53.1
± 2.5	2.56	45.1
± 2	2.21	42.5
± 1.25	1.70	38.9
± 1	1.53	37.5

Note Input voltages may not exceed the working voltage range.

Table 2. Absolute Accuracy at Full Scale, Single-Ended

Range (V)	Typical at 25 °C (mV)	Maximum over Temperature (mV)
± 10	14.7	138

Analog Output

Analog outputs	2
Output resolution	12 bits
Maximum update rate	150 Hz, software-timed

² System noise measured at maximum sample rate.

ANEXO E

Exemplo do código do algoritmo para MATLAB utilizado para o cálculo de deslocamentos verticais. Maiores informações sobre o algoritmo podem ser encontrados no trabalho de Slifka (2004), disponível em: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:oQ68t_oUi-wJ:www-personal.engin.umd.umich.edu/~jwvm/current/Lance/LSlifkaThesis.doc+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br.

```
load ('a.txt');    %Carregar o arquivo de aceleração
load ('t.txt');    %Carregar o arquivo de tempo

afft=fft(a,length(t));

acc=a;

fs=500;

Ts=1/fs;

acc=-1*acc;    %A aceleração e a posição são invertidas em 180°

figure(1)
plot(t,acc), grid on;
xlabel('Tempo (s)','FontSize',12),ylabel('Aceleração (m/s²)','FontSize',12)
title('Aceleração antes da filtragem','FontSize',12);

y=length(t);
w=[0:fs/y:500-(500/y)];

%Filtrando o sinal de aceleração
Acc_Spect=fft(acc,length(t));
x=length(Acc_Spect);

%Anulando os primeiros 20 valores
Acc_Spect(1)=0.0775*Acc_Spect(21);
for i=1:20
    Acc_Spect(i)=0.005*Acc_Spect(21);
    Acc_Spect(x-(i-1))=conj(Acc_Spect(i));
end
acc=real(ifft(Acc_Spect));
```

```

figure(2)
plot(t,acc), grid on;
xlabel('Tempo (s)', 'FontSize', 12), ylabel('Aceleração (m/s²)', 'FontSize', 12)
title('Aceleração depois da filtragem')
figure(3)
plot(w,abs(afft)), xlabel('w', 'FontSize', 12), ylabel('Magnitude', 'FontSize', 12)
title('Frequência da aceleração antes da filtragem', 'FontSize', 12);
figure(4)
plot(w,abs(Acc_Spect)), xlabel('w', 'FontSize', 12), ylabel('Magnitude', 'FontSize', 12)
title('Frequência da aceleração depois da filtragem', 'FontSize', 12);

% 1ª Integral
vel=Ts*cumtrapz(acc);
vel_0=-1*mean(vel);
Vel_Spect=fft(vel,length(t));
x=length(Vel_Spect);
% Tornar os primeiros 25 valores constantes
Vel_Spect(1)=0.0775*Vel_Spect(26);
for i=1:25
    Vel_Spect(i)=0.005*Vel_Spect(26);
    Vel_Spect(x-(i-1))=conj(Vel_Spect(i));
end
vell=real(ifft(Vel_Spect));
vel_spectt=fft(vell,length(t));

figure(5)
plot(w,abs(Vel_Spect)), xlabel('w', 'FontSize', 12), ylabel('Magnitude', 'FontSize', 12)
title('Frequência da velocidade antes da filtragem', 'FontSize', 12);
figure(6)
plot(w,abs(vel_spectt)), xlabel('w', 'FontSize', 12), ylabel('Magnitude', 'FontSize', 12)
title('Frequência da velocidade depois da filtragem', 'FontSize', 12);
figure(7)

```

```

plot(t,vell), grid on;
xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Velocidade (m/s)'),title('Velocidade Vs Tempo')

%2ª Integral para obter a posição
pos_ii=Ts*cumtrapz(vell);
Pos_Spect=fft(pos_ii,length(t));
x=length(Pos_Spect);
% Tornar os primeiros 30 valores constantes
Pos_Spect(1)=0.0775*Pos_Spect(31);
for i=1:30
    Pos_Spect(i)=0.0775*Pos_Spect(31);
    Pos_Spect(x-(i-1))=conj(Pos_Spect(i));
end
pos_ii=real(iff(Pos_Spect));
spect_pos=fft(pos_ii,length(t));

figure(8)
plot(t, pos_ii); grid on;
xlabel('Tempo (s)'),ylabel('Posição (m)'),title('Posição Vs Tempo')

figure(9)
plot(w,abs(Pos_Spect)),xlabel('w','FontSize',12),ylabel('Magnitude','FontSize',12)
title('Frequência da posição antes da filtragem','FontSize',12);

figure(10)
plot(w,abs(spect_pos)),xlabel('w','FontSize',12),ylabel('Magnitude','FontSize',12)
title('Frequência da posição depois da filtragem','FontSize',12);

```