

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

RAFAEL ALBUQUERQUE DE OLIVEIRA

**MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE ROLAMENTO DE PAVIMENTOS
COM DADOS DE SMARTPHONES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2018

RAFAEL ALBUQUERQUE DE OLIVEIRA

MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE ROLAMENTO DE PAVIMENTOS COM DADOS DE SMARTPHONES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a conclusão do curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, *Campus* Pato Branco.

Orientador: Prof. Msc. Danilo Rinaldi Bisconsini



TERMO DE APROVAÇÃO

MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE ROLAMENTO DE PAVIMENTOS COM DADOS DE SMARTPHONES

RAFAEL ALBUQUERQUE DE OLIVEIRA

No dia 15 de agosto de 2018, às 8h20min, na SALA DE TREINAMENTO da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após arguição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná– UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº37-TCC/2018.

Orientador: Prof. Msc. DANILO RINALDI BISCONSINI (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof^a. Dr^a. ELIZÂNGELA MARCELO SILIPRANDI (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof. Msc. JAIRO TROMBETTA (DACOC/UTFPR-PB)

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Francisco Silva de Oliveira e Dinah de Albuquerque, assim como a minha segunda mãe, Léa Aparecida Cardone de Oliveira, a quem amo sem medida, meus maiores e fortes exemplos, pelo amor incondicional, incentivo e apoio em todos os momentos durante esta trajetória. Aos meus irmãos, Lucas Albuquerque de Oliveira e Bianca Cardone de Oliveira, sempre me inspirando a ser alguém melhor, por todo carinho, e paciência dedicados, mesmo estando a centenas de quilômetros nestes últimos anos.

Ao meu orientador, Danilo Rinaldi Bisconsini, que investiu tempo e atenção, além de auxílio durante todo o processo desta pesquisa, sem o qual não teria sido possível finalizá-lo. Aos professores Elizângela Marcelo Siliprandi e Jairo Trombetta, por integrarem a banca de avaliação, obrigado por todos os ensinamentos.

Aos colegas, Mateus Paluch De Souza Bueno, Jakeline Loureiro e Thais Bassotto Bressanelli, do Projeto de Inovação intitulado “Avaliação da Condição de Pavimentos com Smartphones” pelo auxílio durante os levantamentos de dados. Ao DEPATRAN e DNER, por auxiliarem e garantirem segurança nas coletas de dados na rodovia PR-493.

Aos amigos que fiz durante a graduação, pelos momentos de alegria proporcionados, assim como o apoio e incentivo nos momentos de desânimo, os quais são parte essencial e, com toda certeza, permanecerão presentes na minha vida, independentemente da distância. Em especial, aos amigos que dividiram moradia comigo, Cezar, Leonardo, Lucas, Douglas e Rafael, assim como nossa agregada, Brenda, por todos os momentos felizes e aprendizados compartilhados durante estes anos, os quais possuem lugar garantido na minha vida.

À minha amiga mais antiga de universidade e colégio, Geórgia, pela indicação e por ter compartilhado moradia durante os primeiros anos, agradeço cada momento que passamos juntos durante todos estes anos.

Agradeço também aos professores da minha graduação, que de alguma forma exerceram influência e contribuíram para a minha formação profissional.

Obrigado também a todos que, mesmo não sendo citados, colaboraram direta ou indiretamente para a conclusão desta etapa da minha vida. Esta caminhada não teria sido a mesma sem vocês.

“Só um sentido de invenção e uma necessidade intensa de criar levam o homem a revoltar-se, a descobrir e a descobrir-se com lucidez”.

Pablo Picasso

RESUMO

OLIVEIRA, Rafael Albuquerque de. **Monitoramento da Qualidade de Rolamento Com Dados de Smartphones**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

A irregularidade longitudinal de pavimentos afeta os usuários das vias de diversas formas, pois altera a qualidade de rolamento, reduz a segurança de tráfego e sua vida útil, além de aumentar os Custos Operacionais dos Veículos (COV). Desde o início do século XX vários equipamentos têm sido desenvolvidos para realizar a medição deste defeito, porém, ainda não surgiram metodologias que agreguem acurácia, alta produtividade e baixo custo de implementação, o que torna difícil a manutenção de um Banco de Dados atualizado, necessário para o bom funcionamento de um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP). Nos últimos anos, surgiram pesquisas que buscaram utilizar os sinais de acelerômetros e Sistemas de Posicionamento Global (GPS), instalados em smartphones, para esse tipo de monitoramento, devido ao seu baixo custo de uso, facilidade de operação e alta taxa de aquisição de dados. Contudo, ainda existem questionamentos sobre as melhores formas de aplicação dessas informações. Neste trabalho foram realizados levantamentos de campo em trechos com diferentes níveis de irregularidade, nos quais foram obtidos dados de aceleração vertical por meio de um smartphone fixado ao para-brisa de um veículo, trafegando em diferentes velocidades. Estes sinais foram tratados e utilizados para o cálculo de índices de *Root Mean Square* (RMS), que foram correlacionados com dados de Índice de Irregularidade Internacional (IRI), obtidos como referência pelo método de Nível e Mira. Os testes mostraram o potencial do sistema, principalmente em velocidades maiores, atingindo coeficientes de correlação (r de Pearson) de 0,86, e repetitividade admissível, com coeficientes de variação entre 2,7 e 7,9%. Assim, conclui-se que estes dispositivos possuem grande potencial de aplicação quando tomados os devidos cuidados e realizados os tratamentos adequados de seus dados.

Palavras – Chave: Gerência de Pavimentos, Índice de Irregularidade Longitudinal, IRI, Smartphone, Acelerômetro, MEMS, RMS.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Rafael Albuquerque de. **Rolling Quality Monitoring Using Smartphone Data**. Final Paper (Bachelor on Civil Engineering) - Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2018.

The longitudinal pavement roughness affects the road users, as it alters the rolling quality, reduce the traffic safety and its lifespan, and increases the Vehicle Operational Costs (VOC). Since the beginning of the 20th century lots of equipments were developed to measure this defect, although, methodologies that gather accuracy, high productivity and low cost of implementation haven't been developed yet, which complicates the maintenance of an updated Database, necessary for the better functioning of a Pavement Management System (PMS). In the last years, studies that aimed to use accelerometers signals and Global Positioning Systems (GPS), installed in smartphones, for this kind of monitoring, due to its low use cost, easy operation and elevated rate of data acquisition. In this study, field tests were performed in pavement sections with different levels of roughness, in which vertical acceleration data was obtained through a smartphone fixed to a vehicle windshield, traveling in different speeds. These signals were treated and used to the calculation of Root Mean Square values (RMS), which have been correlated with International Roughness Index (IRI), obtained as reference by the Level and Rod method. The tests showed the system's potential, especially in higher speeds, reaching correlation coefficients (Pearson's R) of 0.86, and acceptable repeatability, with coefficients of variation between 2.7 and 7.9%. Therefore, it was concluded that these devices have high application potential when proper care is taken and appropriate treatments of datas are made.

Key – Words: Pavement Management, International Roughness Index, IRI, Smartphone, Accelerometer, MEMS, RMS.

Este trabalho foi realizado em parceria com a equipe executora do Projeto de Inovação intitulado “Avaliação da Condição de Pavimentos com Smartphones” homologado no edital PROREC 02/2018-UTFPR. A coleta e análise dos dados deste Trabalho de Conclusão de Curso foram realizadas em junto aos alunos Mateus Paluch De Souza Bueno, Jakeline Loureiro e Thais Bassotto Bressanelli, e com o coordenador geral do projeto, Prof. Msc. Danilo Rinaldi Bisconsini.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Camadas do Pavimento Flexível.....	26
Figura 2 - Distribuição modal da matriz de transportes regionais de cargas de 2011	27
Figura 3 – Malha Rodoviária Brasileira	28
Figura 4 – Percentual da extensão de rodovias federais pavimentadas por região	29
Figura 5 – Classificação do Pavimento	29
Figura 6 – Índice de Irregularidade Internacional (IRI) da rede rodoviária do estado do Rio de Janeiro.	30
Figura 7 – Representação esquemática de curvas de desempenho e etapas de restauração de um pavimento.	33
Figura 8 – Ilustração da Representação da Irregularidade Longitudinal	35
Figura 9 – Diversas faixas de variação do IRI	36
Figura 10 – Trincamento e afundamento permanente por repetição de cargas.	40
Figura 11 – Extração de corpos de prova e de poços de sondagem	41
Figura 12 – Exemplo de equipamentos DCP de avaliação estrutural expedita de subsolos e camadas de solo	42
Figura 13 – Esquema de um deflectômetro de impacto - FWD.....	43
Figura 14 – Esquema da viga Benkelman (DNER-ME 24/94) e exemplo de medida em campo.....	44
Figura 15 – Representação da leitura do medidor “Viagraph”	49
Figura 16 – Resposta da leitura do medidor de régua móvel.....	50
Figura 17 – Representação da leitura do medidor perfilógrafo.....	50
Figura 18 – <i>BPR Roughometer</i>	52
Figura 19 – Perfilômetro CHLOE.....	53
Figura 20 – Configuração do perfilômetro CHLOE.....	53
Figura 21 – Ilustração esquemática de um Sistema Medidor Rodoviário do Tipo Resposta	55

Figura 22 – Configuração do modelo Quarto de Carro e gráfico de resposta da suspensão em diferentes frequências.	57
Figura 23 – Desenho esquemático e fotografia do equipamento APL.	59
Figura 24 – Medidor PPS-2000	59
Figura 25 – Ilustração esquemática do método Nível e Mira.	60
Figura 26 – Dipstick (esq.); Dipstick em uso (centro); e Walking Profiler (dir.).	61
Figura 27 – Desenho esquemático do equipamento MERLIN	62
Figura 28 – Esquema de um acelerômetro capacitivo.	69
Figura 29 – Estrutura interna de um acelerador MEMS instalado em um smartphone	70
Figura 30 – Imagem da massa sísmica, fabricada no Laboratório de Sistemas Integráveis LSI – EPUSP (Projeto ACELERAD)	70
Figura 31 – Coordenadas dos sensores de um smartphone.....	71
Figura 32 – Interface de registro dos dados pelo aplicativo UTFPR-PB-USP..	71
Figura 33 – ARAN – <i>Automatic Road Analyser</i> (Analisador automático de rodovias).....	73
Figura 34 – Nível a Laser	75
Figura 35 – Levantamento topográfico com auxílio do gabarito confeccionado	75
Figura 36 – Vista aérea da empresa Sementes Guerra	77
Figura 37 – Tráfego de caminhões no trecho analisado	78
Figura 38 – Levantamento topográfico na empresa Sementes Guerra.....	78
Figura 39 – Vista aérea da rua Irineu Parzianello	79
Figura 40 – Levantamento topográfico na rua Irineu Parzianello	80
Figura 41 – Condição da rua Irineu Parzianello	80
Figura 42 – Defeitos na rua Irineu Parzianello	81
Figura 43 – Vista aérea da rua Benjamim Borges dos Santos	81
Figura 44 – Levantamento topográfico com Nível e Mira na rua Benjamim Borges dos Santos	82
Figura 45 – Vista aérea do trecho de coleta no bairro Dona Matilde.....	83
Figura 46 – Levantamento topográfico com Nível e Mira no Bairro Dona Matilde.....	83
Figura 47 – Vista aérea da rodovia PR-493	84

Figura 48 – Levantamento topográfico na rodovia PR-493 com auxílio do DEPATRAN.....	84
Figura 49 – Situação superficial da rodovia PR-493	85
Figura 50 – Afundamentos nas trilhas de roda.....	85
Figura 51 – Exemplo de utilização do Anti-Slip Car Pad.....	88
Figura 52 – Suporte Veicular de Smartphone	89
Figura 53 – Fórmula de Haversine	90
Figura 54 – Perfil da estrada da empresa Sementes Guerra.....	93
Figura 55 – Perfil da rua Irineu Parzianello.....	93
Figura 56 – Perfil da rua Benjamim Borges dos Santos.....	94
Figura 57 – Perfil do trecho do bairro Dona Matilde.....	94
Figura 58 –Perfil da rodovia PR 493.....	94
Figura 59 – Índice de Irregularidade (IRI) dos trechos levantados.....	95
Figura 60 – Classificação quanto à irregularidade da superfície.....	96
Figura 61 – Início do trecho analisado na empresa Sementes Guerra.....	96
Figura 62 – Final do trecho analisado na empresa Sementes Guerra, com detalhe de visualização das deformações permanentes nas trilhas de roda.....	97
Figura 63 – Pista da rodovia PR-493.....	97
Figura 64 – Pavimento da rua Irineu Parzianello.....	98
Figura 65 – Pista da rua do bairro Dona Matilde.....	99
Figura 66 – Pista da rua Benjamim Borges dos Santos.....	99
Figura 67 – Velocidades nos trechos analisados	100
Figura 68 – Sinais de Aceleração obtidos: Sementes Guerra a 40 km/h.....	101
Figura 69 - Sinais de Aceleração obtidos: Sementes Guerra a 60 km/h.....	101
Figura 70 – Sinais de Aceleração Vertical: Sementes Guerra	103
Figura 71 – Sinais de Aceleração Vertical: Irineu Parzianello	104
Figura 72 – Sinais de Aceleração Vertical: Benjamim Borges dos Santos.....	104
Figura 73 – Sinais de Aceleração Vertical: PR-493.....	105
Figura 74 – Sinais de Aceleração: Dona Matilde.....	105
Figura 75 – Correlação entre IRI obtido pelo método Nível e Mira e RMS (smartphone), para todos os segmentos de coleta, com velocidade de 60 km/h	112

Figura 76 – Correlação entre IRI obtido pelo método Nível e Mira e RMS (smartphone), para todos os segmentos de coleta, com velocidade de 40 km/h	112
Figura 77 – Correlação entre IRI obtido pelo método Nível e Mira e RMS (smartphone), para todos os segmentos de coleta, com velocidade de 40 km/h	114
Figura 78 – Correlação entre IRI obtido pelo método Nível e Mira e RMS (smartphone), para todos os segmentos de coleta, com velocidade de 60 km/h	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condição do Pavimento em relação ao IRI	36
Tabela 2 – Padrões de desempenho do IRI para aceitação de obras de restauração e pavimentos novos.....	37
Tabela 3 – Avaliação da repetitividade do índice de RMS de aceleração vertical calculado a cada 100 metros para um total de 10 viagens na Empresa Sementes Guerra	106
Tabela 4 – Avaliação da repetitividade do índice de RMS de aceleração vertical calculado a cada 100 metros para um total de 10 viagens na rua Irineu Parzianello.....	106
Tabela 5 – Avaliação da repetitividade do índice de RMS de aceleração vertical calculado a cada 100 metros para um total de 10 viagens na rua Benjamim Borges dos Santos	106
Tabela 6 – Avaliação da repetitividades do índice de RMS de aceleração vertical calculado a cada 100 metros para um total de 10 viagens na rodovia PR-493	107
Tabela 7 – Avaliação da repetitividade do índice de RMS de aceleração vertical calculado a cada 100 metros para um total de 10 viagens na rua analisado do bairro Dona Matilde	107
Tabela 8 – Avaliação da repetitividade do índice de RMS calculado a cada 50 metros para um total de viagens na empresa Sementes Guerra	108
Tabela 9 – Avaliação da repetitividade do índice de RMS de aceleração vertical calculado a cada 50 metros para um total de 10 viagens na rua Irineu Parzianello	109
Tabela 10 – Avaliação da repetitividade do índice de RMS de aceleração vertical calculado a cada 50 metros para um total de 10 viagens na rua Benjamim Borges dos Santos	109
Tabela 11 – Avaliação da repetitividade do índice de RMS de aceleração vertical calculado a cada 50 metros para um total de 10 viagens na rodovia PR-493	110
Tabela 12 – Avaliação da repetitividade do índice de RMS de aceleração vertical calculado a cada 50 metros para um total de 10 viagens na rua avaliada do bairro Dona Matilde	110

Tabela 13 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h	128
Tabela 14 – Valores de RMS médios: Velocidade: 60 km/h	129
Tabela 15 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h	129
Tabela 16 – Valores de RMS médios: Velocidade: 60 km/h	129
Tabela 17 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h	130
Tabela 18 – Valores de RMS médios: 60 km/h	130
Tabela 19 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h	130
Tabela 20 – Valores de RMS médios: Velocidade: 60 km/h	131
Tabela 21 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h	131
Tabela 22 – Valores de RMS médios: Velocidade 60 km/h	131
Tabela 23 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h	131
Tabela 24 – Valores de RMS médios: Velocidade: 60 km/h	132
Tabela 25 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h	132
Tabela 26 – Valores de RMS médios: Velocidade: 60 km/h	132
Tabela 27 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h	132
Tabela 28 – Valores de RMS médios: Velocidade: 60 km/h	133
Tabela 29 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h	133
Tabela 30 – Valores de RMS médios: Velocidade: 60 km/h	133
Tabela 31 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h	133
Tabela 32 – Valores de RMS médios: Velocidade: 60 km/h	133

LISTA DE SIGLAS

AASHO	Association of States Highway Officials
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Office</i>
APL	Analisador de Perfil Longitudinal
ARAN	<i>Automatic Road Analyzer</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>
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CHLOE	<i>Carey, Hutckins, Lathers and Others Engineers</i>
CNT	Confederação Nacional do Transporte
COV	Custos Operacionais dos Veículos
CSV	<i>Comma Separated Values</i>
DCP	<i>Dynamic Cone Penetrometer</i>
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FC	Fatores de Equivalência
FFT	<i>Fast Fourier Transformation</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
GM	<i>General Motors</i>
GMR	<i>General Motors Research</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HDM	<i>Highway Design and Maintenance Standards Models</i>
IGG	Índice de Gravidade Global
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IRI	<i>International Roughness Index</i>
IRRE	<i>International Road Roughness Experiment</i>
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LVC	Levantamento Visual Contínuo

MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
MERLIN	<i>Machine for Evaluating Roughness Using Low-cost Instrumentation</i>
NDT	<i>Nondestructive Deflection Testing</i>
PB	Pato Branco
PCA	<i>Portland Cement Association</i>
PNLT	Plano Nacional de Logística e Transporte
PPS	<i>Pavement Profile Scanner</i>
PR	Paraná
PRO	Procedimento
ProVAL	<i>Profile Viewing and Analysis)</i>
QCS	<i>Quarter-Car-Simulation</i>
QI	<i>Quarter-Car Index</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RTRRMS	<i>Response Type Road Roughness Measurement Systems</i>
SENAT	Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte
SEST	Serviço Social do Transporte
SGP	Sistema de Gerência de Pavimentos
SNV	Sistema Nacional de Viação
TKU	Toneladas por Quilômetro Útil
ToF	<i>Time-of-Flight</i>
TRL	<i>Transport Research Laboratory</i>
TRRL	<i>Transport and Road Research Laboratory</i>
USP	Universidade de São Paulo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VB	Viga Benkelman
VIMS	<i>Vehicle Intelligent Monitoring System</i>
VMD	Volume Médio Diário
VMDA	Volume Médio Diário Anual
VNI	<i>Visual Networking Index</i>
VSA	Valor de Serventia Atual

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 OBJETIVOS.....	24
1.1.1 Objetivo Geral.....	24
1.1.2 Objetivos Específicos.....	24
1.2 JUSTIFICATIVA.....	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 CONDIÇÃO DAS RODOVIAS NO BRASIL.....	26
2.2 CONCEITOS DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS.....	31
2.3 SISTEMA DE REFERÊNCIA.....	31
2.4 AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS.....	32
2.4.1 Condições Funcionais.....	33
2.4.2 Condições Estruturais.....	39
2.4.3 Condições Operacionais.....	45
2.5 DETERMINAÇÃO DE PRIORIDADES.....	46
2.6 PROGRAMA PLURIANUAL DE INVESTIMENTOS.....	47
2.7 DADOS NECESSÁRIOS PARA A AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS.....	47
2.8 HISTÓRICO DA MENSURAÇÃO DE PAVIMENTOS.....	48
2.9 O USO DE SMARTPHONES PARA A MEDIÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS.....	63
2.10 PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	68
3 MATERIAIS E MÉTODOS	75
3.1 OBTENÇÃO DOS ÍNDICES DE IRREGULARIDADE DE REFERÊNCIA.....	75
3.1.1 Trecho 1 – Empresa Sementes Guerra.....	77
3.1.2 Trecho 2 – Rua Irineu Parzianello.....	79
3.1.3 Trecho 3 – Rua Benjamim Borges dos Santos.....	81
3.1.4 Trecho 4 – Bairro Dona Matilde.....	82
3.1.5 Trecho 5 – Rodovia PR-493.....	83
3.2 LEVANTAMENTO DA IRREGULARIDADE A PARTIR DE UM SMARTPHONE.....	86
3.2.1 Escolha Do Modelo De Smartphone.....	86

3.2.2 Aplicativo Utilizado na Coleta de Dados com Smartphones	86
3.2.3 Escolha do Suporte.....	88
3.2.4 Modelo do Veículo	90
3.2.5 Processamento dos Dados	90
3.2.6 Cálculo Dos Valores De RMS De Aceleração Com Smartphones.....	91
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	93
4.1 RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO DE NÍVEL E MIRA	93
4.2 RESULTADOS OBTIDOS PELOS SMARTPHONES	100
4.3 CÁLCULO DOS VALORES DE RMS DE ACELERAÇÃO VERTICAL	102
4.4 CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS OBTIDOS PELO MÉTODO NÍVEL E MIRA E PELOS SMARTPHONES	111
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	115
REFERÊNCIAS.....	119
APÊNDICE.....	128

1 INTRODUÇÃO

A qualidade de rolamento do pavimento é o principal fator percebido pelo usuário durante a viagem dentro de um veículo, e está atrelada à sua experiência durante o passeio, a qual é influenciada por diversos fatores, como a suavidade da pista (traduzida como a ausência de irregularidades em sua superfície), alinhamento da rodovia, barulhos no carro, má condição de luz, etc. Os padrões internacionais de qualidade de rolamento afirmam que os níveis de aceitabilidade de vibrações nas estradas dependem de variados parâmetros, como duração da viagem, atividades dos passageiros, temperatura, entre outros (NIETSCHE *et al.*, 2014).

Assim como exerce influência sobre a qualidade de rolamento, a irregularidade longitudinal da superfície do pavimento altera as condições de tráfego e segurança dos usuários da via, constituindo o parâmetro mais influente na definição da qualidade funcional de uma rodovia. Carey e Irick (1960) listam a irregularidade longitudinal de pavimentos como o principal defeito atrelado à avaliação funcional de pavimentos, baseando-se no conceito de serventia-desempenho, criado e desenvolvido pelos autores através dos resultados dos experimentos do *AASHO Road Test*. Em geral, nas diversas definições encontradas na literatura, a irregularidade longitudinal é a causa vários problemas, principalmente o desconforto facilmente percebido pelos usuários durante o passeio.

Como mencionado, além do desconforto causado ao usuário, a irregularidade longitudinal também afeta a segurança na condução dos veículos, como aponta uma pesquisa sueca, na qual se notou que os acidentes de diferentes tipos (danos a propriedades, lesões menores, tratamento médico, hospitalização, fatalidades) aumentavam conforme a irregularidade longitudinal nos trechos analisados crescia. Porém, o aumento no índice de irregularidade se mostrou mais influente em acidentes com apenas um veículo, em comparação aos acidentes envolvendo mais de um automóvel (IHS, 2004).

A irregularidade longitudinal pode ter diversas origens, como problemas construtivos (má execução), defeitos causados pela carga dinâmica do tráfego

ou provenientes de efeitos climáticos, em especial as deformações permanentes no subleito e no pavimento. Também é válido considerar que a irregularidade longitudinal não se trata somente de mais um problema superficial do pavimento, mas sim de um indicativo do resultado da influência de diversos outros problemas que geram alterações na qualidade de rolamento dos veículos, como explica o Manual de Gerência de Pavimentos do DNIT (2011).

Como apontado por Buttlar e Islam (2012), as despesas dos usuários, representadas pelos Custos Operacionais dos Veículos (COV) incluem: consumo de combustível, depreciação, custo e manutenção do veículo e gasto de pneus. Indicaram que os COV estão diretamente ligados com à irregularidade longitudinal e superam os valores dos investimentos rodoviários, que não alcançam 4% dos custos totais, ao passo que os COV afetam os usuários dramaticamente.

Desta forma, faz-se necessário o acompanhamento e mensuração deste defeito, que é medido por meio de diferentes métodos e equipamentos, e quantificado principalmente pelo Índice de Irregularidade Internacional – IRI, estabelecido pelo Banco Mundial em 1986. Estes instrumentos de medição são classificados de acordo com a forma como medem a irregularidade do perfil (SAYERS, 1990). Mesmo que existam diferentes tipos, ainda não existe um que agregue acurácia, alta produtividade e baixo custo.

Uma das tecnologias de uso mais comum pela população, os smartphones, possuem sensores, acelerômetro e GPS, capazes de produzir dados relacionados à irregularidade longitudinal.

Assim, este trabalho objetiva analisar o potencial destes dispositivos como uma alternativa para estes outros sistemas, visto a sua alta capacidade de produção de dados, baixo custo de implementação e facilidade de uso.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o potencial da aplicação dos dados registrados pelos sensores de movimento e posição de *smartphones* para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o potencial de smartphones em relação à produção de dados compatíveis com a irregularidade longitudinal de pavimentos, com diferentes níveis de irregularidade e velocidades do veículo;
- Avaliar a repetitividade das acelerações registradas pelo acelerômetro instalado em smartphones em termos de RMS – *Root Mean Square* (Raiz da Média Quadrática), por meio do desvio padrão e coeficientes de variação das amostras obtidas.

1.2 JUSTIFICATIVA

A possibilidade de realizar medições objetivas da condição superficial do pavimento se mostra de grande valia para Sistemas de Gerência de Pavimentos. Além de serem importantes para o gerenciamento em nível de rede, estes dados também podem servir como indicativo de controle de segurança, e de qualidade, para a administração em nível de projeto, na qual essas análises são usadas para se definir quais as melhores estratégias de investimentos, como em intervenções de manutenção ou reabilitação da malha rodoviária.

Geralmente os equipamentos empregados para realizar estes levantamentos são de custo elevado. Conseqüentemente, as agências que dependem destes dados podem limitar a frequência de coleta, para ciclos anuais ou períodos mais longos. A possibilidade de diminuir o intervalo entre coletas melhoraria a capacidade da agência de responder às mudanças na rede

rodoviária, devido às ações climáticas ou condições de tráfego, resultando em intervenções administrativas mais rápidas.

Portanto, a existência de outras opções de equipamentos, mais acessíveis, pode servir como incentivo para países em desenvolvimento e aumentaria a probabilidade de desenvolverem melhores práticas estratégicas de investimentos na manutenção das rodovias.

Uma das tecnologias mais promissoras para ser um destes métodos de medição de baixo custo é a empregada nos smartphones, dispositivos que contam com uma gama de sensores, como acelerômetros, sistemas de posicionamento global, giroscópios, entre outros. Ainda que de uso cada vez mais comum pela população, apenas recentemente tem sido objeto de estudos em outras áreas, como para avaliar o seu potencial de meio de avaliação no sistema rodoviário.

Em virtude de sua alta capacidade de produção de dados, os smartphones se apresentam como uma alternativa aos equipamentos de medição de irregularidade longitudinal, visto que produzem dados relacionados à qualidade de rolamento das rodovias com uma confiabilidade suficiente para aplicações em sistemas de gerência em nível de rede, nos quais as informações utilizadas são relacionadas à toda a malha, assim como um auxílio para outros métodos mais adequados para avaliações em nível de projeto.

Esta pesquisa busca avaliar a aplicação destes dispositivos no levantamento de dados relacionados à irregularidade longitudinal de pavimentos. Embora outros trabalhos nesta área tenham produzido bons resultados, ainda não existe um consenso sobre a qualidade dos sinais e qual seria a melhor abordagem de os relacionar com os gerados por outras metodologias.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O pavimento é uma estrutura composta por diversas camadas (Figura 1), construída sobre a etapa final da terraplanagem, conhecida como subleito. É projetado, econômica e tecnicamente, para resistir aos esforços causados pelo fluxo de tráfego de veículos, resistir às ações do clima e a garantir condições mínimas de qualidade de rolamento, com conforto, economia e segurança aos seus usuários (DNIT, 2006).

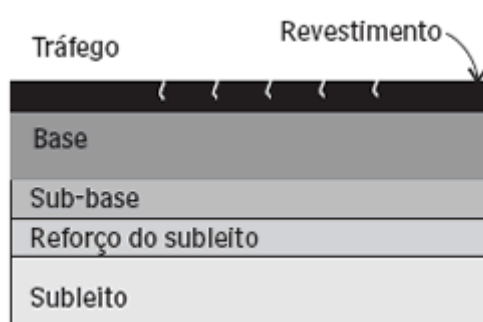


Figura 1 – Camadas do Pavimento Flexível
Fonte: Téchne, 2006.

A qualidade de rolamento pode ser definida como o grau de proteção que o veículo oferece para o seu ocupante em relação aos fatores que alteram o conforto no passeio. Estes fatores podem estar associados à condição do pavimento (superfícies desniveladas e anomalias na estrada), como panelas, trincas e remendos, ou outros fatores, como frenagem abrupta, rápida aceleração e a velocidade nas curvas (BRIDGELALL *et al.* 2016).

Conforme Bernucci *et al.* (2010), a qualidade de rolamento da rodovia é o elemento mais importante para o usuário, já que os defeitos e irregularidades nessa superfície são notados com grande facilidade e, portanto, afetam o conforto e a segurança de tráfego.

2.1 CONDIÇÃO DAS RODOVIAS NO BRASIL

As rodovias constituem o setor mais expressivo de escoamento de cargas no país, chegando a praticamente todo o território brasileiro, exercendo grande

influência na atividade econômica nacional. Devido a isso, torna-se muito importante o monitoramento contínuo da situação da malha rodoviária, para garantir um planejamento estratégico efetivo, facilitando o acompanhamento das soluções adotadas para cada intervenção nos trechos de estradas em intervalos periódicos (DNIT, 2013).

Como demonstrado pelo Plano de Reavaliação de Estimativas e Metas do PNLT de 2012, a matriz da distribuição de cargas nos diferentes modais do Brasil não é equilibrada, como mostra a Figura 2, onde se observa a expressividade do modal rodoviário para o escoamento da produção nacional (PNLT, 2012).

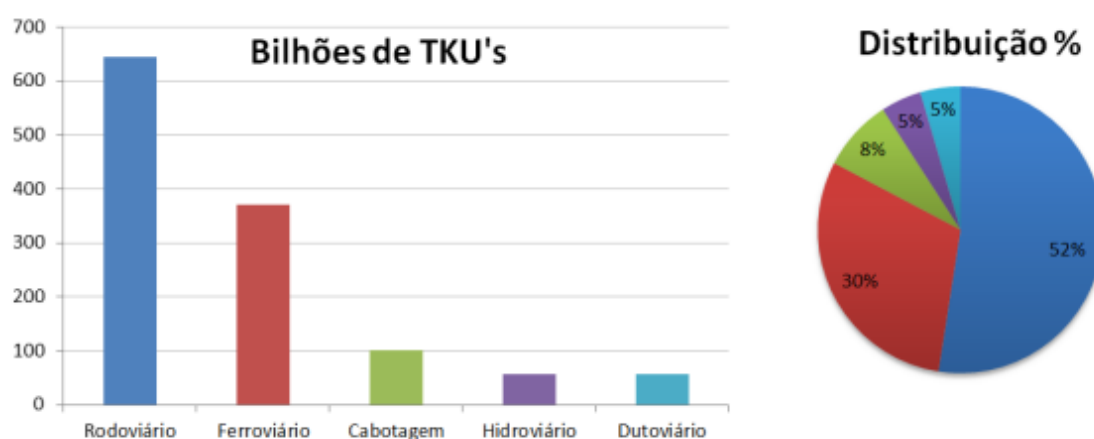


Figura 2 - Distribuição modal da matriz de transportes regionais de cargas de 2011
Fonte: PNLT, 2012.

Desde 1995, a Confederação Nacional dos Transportes realiza a Pesquisa de Rodovias, iniciativa desenvolvida em conjunto com o Serviço Social de Transporte (SEST) e também com o Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte (SENAT), e apresenta os resultados em seu Relatório Gerencial respectivo. Em sua 21ª edição, de 2017, a Pesquisa CNT de Rodovias percorreu 105.814 quilômetros de rodovias asfaltadas em todo o território nacional, para avaliar a evolução qualitativa da malha rodoviária e listar os locais com necessidade de prioridade de investimentos (CNT, 2017).

Ainda que tenha crescido nos últimos anos, a densidade da malha rodoviária brasileira é pequena, quando comparada a de outros países de extensões semelhantes, ou até mesmo a de países da América Latina. Para exemplificar este fato, o Brasil possui cerca de 24,8 km de rodovias asfaltadas para cada mil quilômetros quadrados de área, ao passo que o Uruguai tenha 46 km de rodovias, para os mesmos 1.000 km² (CNT, 2017).

Ainda conforme a Pesquisa CNT de Rodovias, o país possui 1.735.621 km de rodovias, das quais 1.365.426 km não possuem pavimento, 157.309 km estão em planejamento, e apenas 212.886 km são pavimentadas, representando apenas 12,3% do total da malha rodoviária nacional, como mostrado na Figura 3.

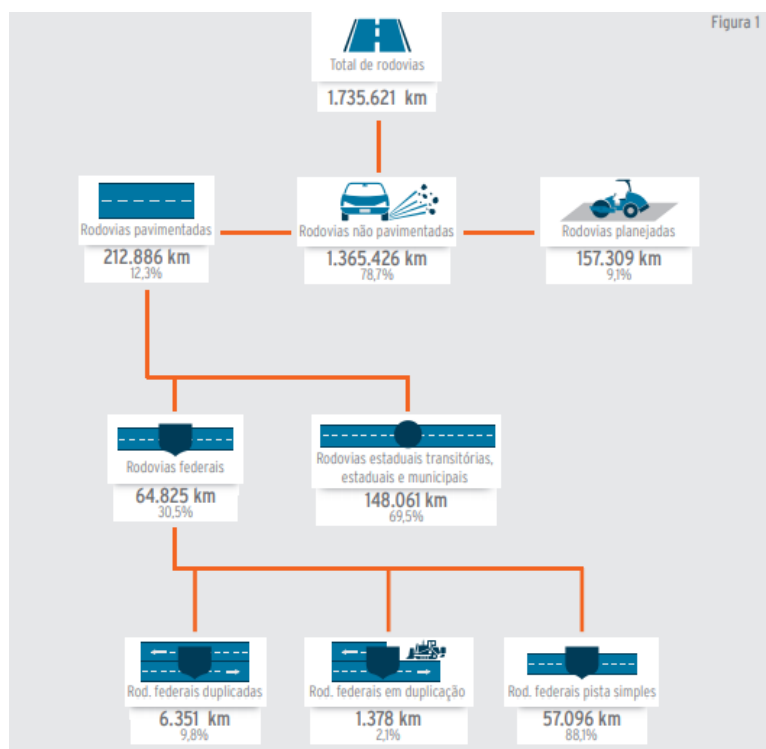


Figura 3 – Malha Rodoviária Brasileira
Fonte: CNT, 2017.

Em relação as rodovias federais pavimentadas, nota-se que estas crescem, aproximadamente, 1,0% ao ano, somando 11,3% na última década. Quanto à distribuição regional desta infraestrutura, percebe-se na Figura 4 que a região nordeste possui a maior extensão, com 19.864,8 km, o que representa 30,6% do total, seguido das regiões sudeste e sul, onde se concentram 12.565,1 km e 12.039,2 km, respectivamente, representando 19,4% e 18,6% da malha rodoviária nacional pavimentada (CNT, 2017).

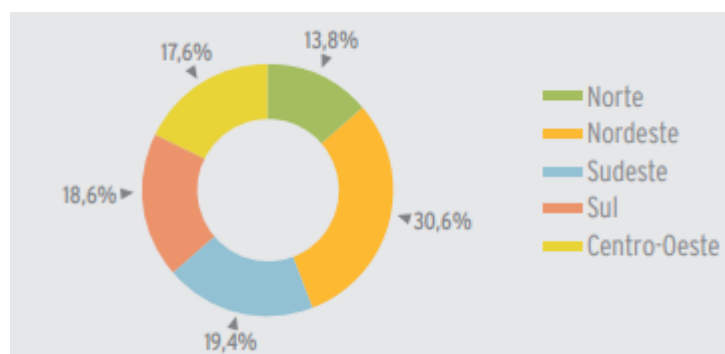


Figura 4 – Percentual da extensão de rodovias federais pavimentadas por região
Fonte: CNT, 2017.

A Pesquisa CNT de Rodovias avalia a malha rodoviária federal desde 2004, e em 2017, foram analisados 67.404 km, o que representa 63,7% do total pesquisado. Dentro desta extensão, 32.424 km foram definidos em ótimo estado, representando quase metade de toda a malha avaliada, como pode ser observado na Figura 5, a seguir.

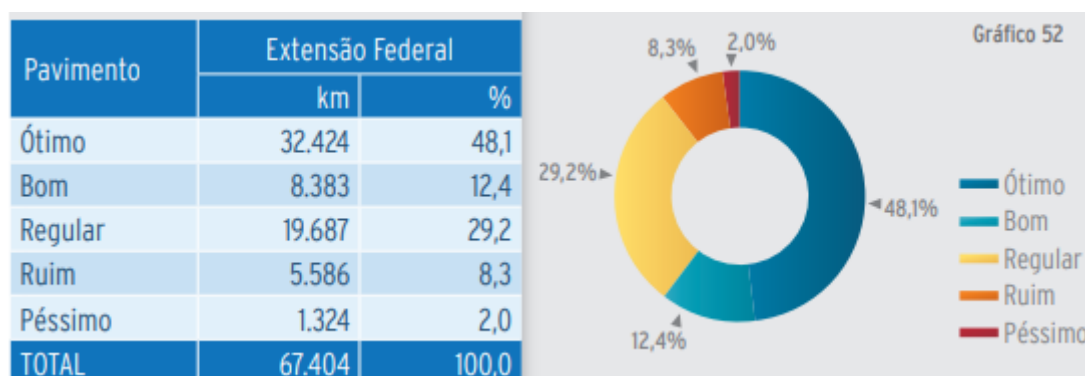


Figura 5 – Classificação do Pavimento
Fonte: CNT, 2017.

Como já citado, a condição da superfície do pavimento é sentida com facilidade pelos usuários da rodovia, pois as anomalias e irregularidades afetam a segurança no escoamento do tráfego e no conforto de rolamento, bem como diminuem a durabilidade das peças veiculares. Para realizar a avaliação desta situação, uma das metodologias é analisar o Índice de Irregularidade Internacional (IRI), o indicador mais expressivo na análise da condição funcional de rodovias (DNIT, 2011).

Entre os anos de 2012 e 2013 foram realizados levantamentos de campo nas rodovias federais BR-040, BR-101, BR-354, BR-356 e BR-393, todas no estado do Rio de Janeiro, pelo Departamento Nacional de Infraestrutura do

Transporte – DNIT, e o mesmo apresentou os resultados no Relatório dos Levantamentos Funcionais das Rodovias Federais, ainda em 2013 (Figura 6).



Figura 6 – Índice de Irregularidade Internacional (IRI) da rede rodoviária do estado do Rio de Janeiro.
Fonte: DNIT, 2013.

A condição das estradas é de grande importância para a economia nacional, considerando-se que os custos com o transporte aumentam conforme cresce a degradação das rodovias e, com isso, aumenta o custo final dos produtos, o chamado “Custo Brasil”.

Os fatores que mais influenciam nestes custos são os pertinentes às condições estruturais e funcionais da estrada, dando atenção especial ao estado da superfície, que interfere nos custos de operação das transportadoras, uma vez que em condições ruins os gastos com combustível e manutenção são maiores.

O conhecimento sobre a situação estrutural e funcional da malha rodoviária é de extrema importância para o planejamento e projeto de novos pavimentos, e também para programas de aplicação dos recursos públicos disponíveis. Para que isso seja possível, os levantamentos precisam de confiabilidade e acurácia, visto que a seleção do tipo de solução e o dimensionamento do pavimento serão baseados nesses valores.

2.2 CONCEITOS DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS

Conforme Marcon (1996), um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) é composto por uma gama de ferramentas e métodos destinados a auxiliar na seleção das medidas que mais se adequem ao planejamento, projeto, construção e manutenção da condição dos pavimentos de uma malha rodoviária, a partir da escolha da melhor estratégia de aplicação dos recursos disponíveis.

Mais precisamente, um SGP é um conjunto de metodologias, ou ferramentas, que auxiliam a agência de administração da rede de rodovias a encontrar as estratégias mais adequadas de investimento, para prover, avaliar e realizar a manutenção de pavimentos, procurando garantir níveis de qualidade aceitáveis durante um dado período de tempo (AASHTO, 1993).

A Gerência de Pavimentos é tida como um importante artifício na administração das rodovias em diferentes níveis de intervenção, a fim de responder às necessidades dos usuários dentro de um planejamento que garanta a melhor relação custo-benefício (DNIT, 2011).

Conforme o Manual de Gerência de Pavimentos do DNIT (2011), um SGP possui componentes que precisam funcionar de maneira coordenada: o planejamento, o projeto, a construção e a manutenção da qualidade dos pavimentos. Os fatores externos, que influenciam na eficiência desse sistema, são: os recursos primários, os dados de avaliação, as diretrizes políticas e administrativas.

As atividades de um SGP estão normalmente atreladas à área de planejamento e podem ser agrupadas em quatro grandes atividades básicas que formam a base de implantação e alimentação de um banco de dados: sistema de referência, avaliação de pavimentos, determinação das prioridades e elaboração do programa plurianual de investimentos.

2.3 SISTEMA DE REFERÊNCIA

Os resultados dos levantamentos de um SGP devem estar anexados à rede rodoviária. Desta forma, para dar início ao planejamento da coleta de

informações do sistema, procura-se definir um sistema eficiente de referência (DNIT, 2011).

Para as rodovias federais, por exemplo, o DNIT faz uso do Sistema Nacional de Viação (SNV), que separa e classifica as rodovias da malha em trechos por meio de determinados critérios, como a nomenclatura da rodovia ou região onde se localiza, situação física da rodovia, entre outros. A Confederação Nacional de Transportes (CNT) também avalia e fornece dados acerca da situação das rodovias para cada região do país, como a condição dos pavimentos e informações sobre o transporte nacional.

Após a reformulação do SGP em 2001, foi adicionada uma nova classificação com subdivisão da malha em segmentos homogêneos. A informação destes subtrechos é embasada nos levantamentos feitos em toda a rede federal e são aplicados na divulgação dos índices da condição da malha federal e na alimentação contínua do banco de dados do sistema (DNIT, 2011).

2.4 AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS

A avaliação de pavimentos é uma das fases mais importantes de um SGP, por ser o marco inicial para a análise de processos e tomada de futuras decisões. Tal atividade torna possível a definição das condições funcionais, estruturais e operacionais dos pavimentos e, assim, promove a possibilidade de criação de estratégias administrativas mais eficientes (DNIT, 2011).

Segundo Bernucci *et al.* (2008), os pavimentos são estruturas que não apresentam ruptura súbita, mas sim degradações funcionais e estruturais acumuladas a partir da sua abertura ao tráfego. Na avaliação de pavimentos é possível citar alguns conceitos importantes:

- Serventia: garantia da qualidade da rodovia em relação aos aspectos de conforto de rolamento e segurança para os quais foi construída;
- Desempenho: variação da condição de serventia ao longo do tempo, conforme seu uso e tráfego;

- Gerência: otimização dos recursos aplicados durante todas as fases de gestão e administração;
- Restauração: ações de correção localizadas para restabelecer integralmente ou em partes as características técnicas originais, que incluem ações de manutenção preventivas e de reforço.

Uma forma de representar a variação do desempenho de um pavimento ao longo de vários ciclos de restauração pode ser visualizada na Figura 7. A escolha do critério pode ser tanto funcional quanto estrutural, e o nível mínimo aceitável para este parâmetro define o momento de fazer a intervenção corretiva de restauração ou reforço.

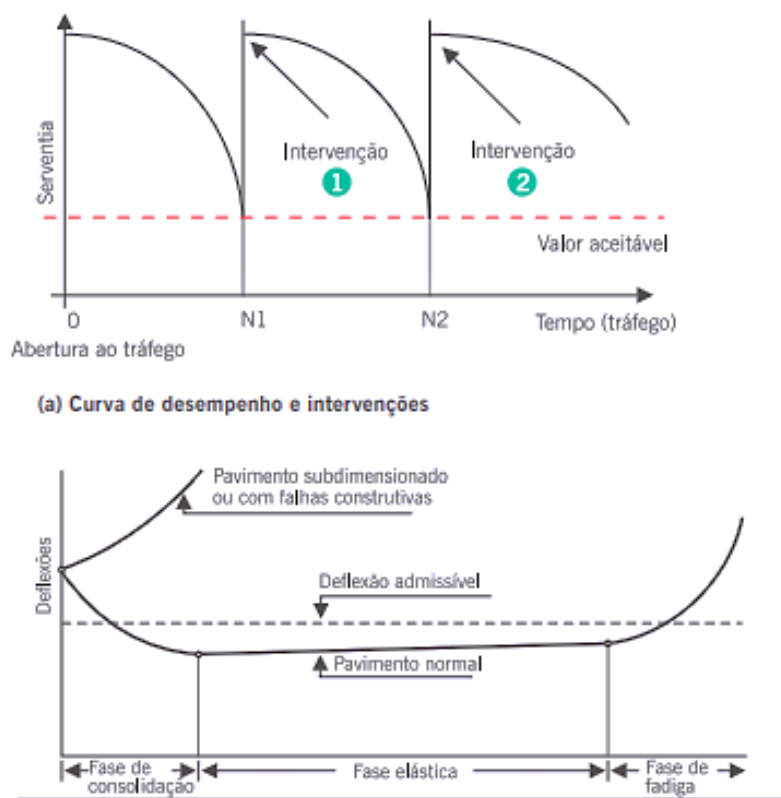


Figura 7 – Representação esquemática de curvas de desempenho e etapas de restauração de um pavimento.
Fonte: Bernucci *et al.*, 2008.

2.4.1 Condições Funcionais

Conforme o Manual de Gerência de Pavimentos (DNIT, 2011), a avaliação das condições funcionais está atrelada à apreciação da situação de sua

superfície e de como este interfere no conforto de rolamento dos usuários. Os dois parâmetros mais utilizados para esse fim são o Índice de Irregularidade Internacional (IRI) e o Valor de Serventia Atual (VSA).

Com o passar do tempo o VSA tem sido substituído pelo Levantamento Visual Contínuo (LVC). Portanto, nesta revisão serão abordados o LVC e o IRI, com maior enfoque para o último, visto que é o índice de interesse neste trabalho.

2.4.1.1 Levantamento Visual Contínuo

O Levantamento Visual Contínuo objetiva a análise e quantificação do nível de defeitos em uma via. A avaliação da condição da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos é feita por meio da observação e análise dos registros visuais dos defeitos existentes no pavimento da rodovia (DNIT, 2013).

Para Cunha (2008), o LVC fornece informações sobre o nível de degradação do pavimento, de modo a funcionar como base para a seleção da intervenção mais adequada, para a priorização de recursos, para a geração de modelos de desempenho, entre outros.

O LVC também produz elementos para a avaliação do Índice de Gravidade Global (IGG), com informações importantes para a utilização do Modelo de Padrão de Desempenho HDM-4 (DNIT, 2011).

2.4.1.2 Índice de Irregularidade Longitudinal

A norma DNER-PRO 164/94 (DNER, 1994, p. 3) define a irregularidade longitudinal de pavimentos como: “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”.

Segundo o DNIT (2011) e a norma americana ASTM E 1926-98, a irregularidade longitudinal é representada pela soma dos desvios verticais da superfície de um pavimento em relação a um plano de referência horizontal do projeto geométrico, com características dimensionais que afetam a dinâmica dos veículos, o efeito dinâmico das cargas, a qualidade ao rolamento e a drenagem superficial da via. Para ilustrar estas definições, na Figura 8 é apresentado um esquema da irregularidade.

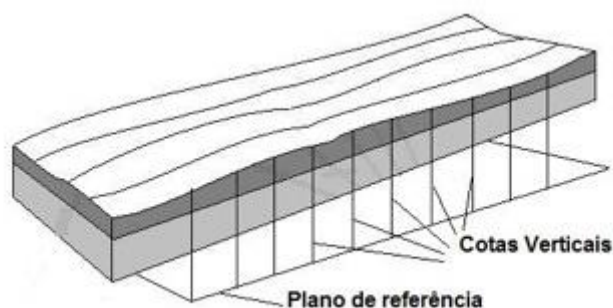


Figura 8 – Ilustração da Representação da Irregularidade Longitudinal
Fonte: LDSV, 2018.

Portanto, pode-se dizer que, como a irregularidade longitudinal altera as condições de tráfego, a mesma se relaciona diretamente com a qualidade de rolamento e a segurança dos usuários da via, constituindo o parâmetro mais influente na definição da qualidade funcional de uma rodovia.

A qualidade de rolamento afeta a experiência de passeio do usuário da via, a qual é influenciada por diversos fatores, como a suavidade da pista (ausência de vibrações excessivas), alinhamento da rodovia, barulhos no carro, má condição de luz, etc. Os padrões internacionais de qualidade de rolamento afirmam que os níveis de aceitabilidade de vibrações nas estradas dependem de variados parâmetros, como duração da viagem, atividades dos passageiros, temperatura, entre outros (NIETSCHE *et al.*, 2014).

De acordo com a literatura, existem diversas escalas padronizadas para a medição da irregularidade, que se diferencia conforme o equipamento de medição utilizado. King (2014) explica que o Índice de Irregularidade Internacional (IRI) é um dado estático baseado em um perfil, o qual é usado mundialmente como um índice econômico para a coleta e a comparação da suavidade superficial em pavimentos.

Conforme Gillespie *et al.* (1986), o IRI foi criado a partir de experimentos realizados no Brasil pelo Banco Mundial, chamados de IRRE (*International Road Roughness Experiment*).

Segundo Paterson (1987), o IRI possui faixas de valores correspondentes para cada estado de pavimento:

- IRI = 0 – Superfície perfeitamente plana;
- IRI = 6 – Rodovias pavimentadas com irregularidade média;
- IRI = 12 – Rodovias pavimentadas extremamente irregulares com remendos e painéis;
- IRI = 20 – Rodovias não pavimentadas extremamente irregulares.

No Brasil, o DNIT (2011) definiu classificações de conceitos atribuíveis relacionados às condições superficiais, mais especificamente ao IRI, como indicado na Tabela 1.

Tabela 1 – Condição do Pavimento em relação ao IRI

Conceito	IRI (m/km)
Bom	< 3,0
Regular	3,0 < IRI < 4,0
Ruim	4,0 < IRI < 5,5
Péssimo	> 5,5

Fonte: DNIT, 2011.

Para exemplificar a definição dada para a condição do pavimento de acordo com o IRI, a Figura 9 mostra diversas faixas de classificação, definidas no Manual de Gerência de Pavimentos de 2011 do DNIT.

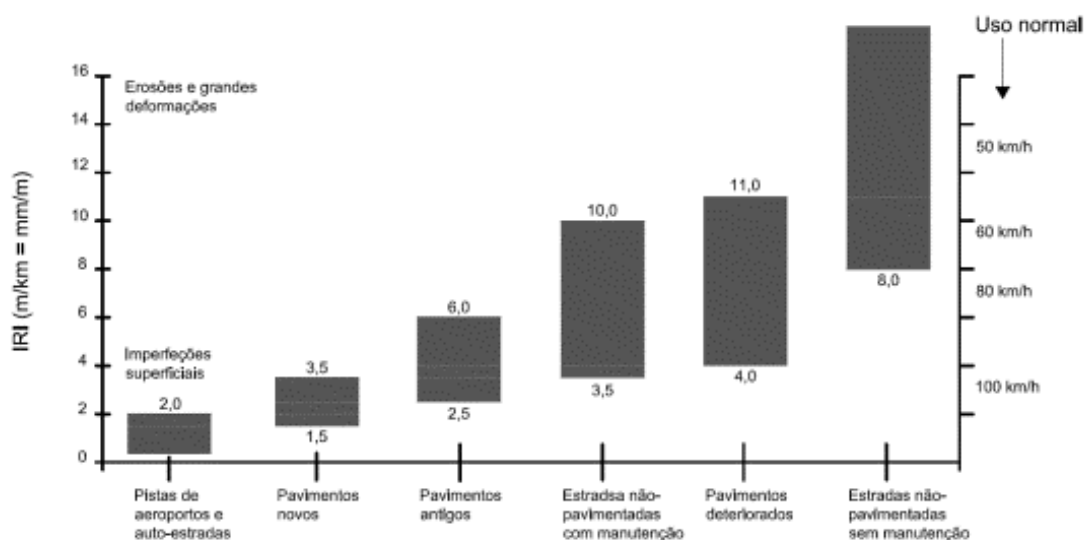


Figura 9 – Diversas faixas de variação do IRI
Fonte: DNIT, 2011.

Em sua Instrução de Serviço nº 13/2013, o DNIT apresentou o seguinte (Tabela 2) padrão de desempenho.

Tabela 2 – Padrões de desempenho do IRI para aceitação de obras de restauração e pavimentos novos

Padrões Exigidos	Condições do Pavimento
IRI \leq 2,3 m/km	Pavimentos novos com CBUQ
IRI \leq 2,5 m/km	Pavimentos novos com Tratamentos Superficiais
IRI \leq 2,7 m/km	Pavimentos restaurados com CBUQ
IRI \leq 3,0 m/km	Pavimentos restaurados com Tratamento Superficial

Fonte: DNIT, 2013.

A irregularidade longitudinal pode ter diversas origens, como problemas construtivos (má execução), defeitos causados pela carga dinâmica do tráfego ou provenientes de efeitos climáticos, em especial as deformações permanentes no subleito e no pavimento. A irregularidade longitudinal não se trata somente de mais um problema superficial do pavimento, mas sim do resultado da influência de diversos outros problemas que geram alterações na qualidade de rolamento dos veículos (DNIT, 2011).

Carey e Irick (1960) listam a irregularidade longitudinal de pavimentos como o principal defeito relacionado à avaliação funcional de pavimentos, baseando-se no conceito de serventia-desempenho, criado e desenvolvido pelos autores através dos resultados dos experimentos da *AASHO Road Test*. Em geral, nas diversas definições encontradas na literatura, a irregularidade longitudinal é a causa vários problemas, principalmente o desconforto facilmente percebido pelos usuários durante o passeio.

A norma americana ASTM E 1777-96 indica como de alta prioridade a coleta de valores de irregularidade entre os dados de desempenho para sistemas de gerência, tanto em nível de rede quanto em nível de projeto.

Os custos dos usuários, representado pelos Custos Operacionais dos Veículos (COV), quando comparados aos investimentos rodoviários para a construção de um novo pavimento, tanto na sua execução, quanto manutenção, são essencialmente maiores quando considerada toda a frota que utiliza o pavimento do trecho analisado (CHATTI e ZAABAR, 2012).

Como apontado por Buttlar e Islam (2012), as despesas dos usuários, representadas pelos COV, que incluem o consumo de combustível, a depreciação, o custo e a manutenção do veículo, o gasto de pneus, etc., estão diretamente ligados à irregularidade longitudinal e superam os valores dos

investimentos rodoviários, que não alcançam 4% dos custos totais, ao passo que os COV afetam os usuários de maneira significativa.

O IRI pode ser obtido por meio de diversos equipamentos, sendo o índice mais indicado para outras aplicações. Sayers e Karamihas (1998) citam o IRI como a principal métrica quando se deseja estimar o COV em geral, limites de segurança nas curvas, qualidade de rolamento e a condição superficial da rodovia.

Como indicado por Gillespie *et al.* (1986) no artigo técnico número 46, para o Banco Mundial, os sistemas de mensuração de irregularidade são separados em quatro grupos, variando desde os métodos perfilométricos (2 grupos) – sendo estes de maior acurácia, para análises detalhadas – até os sistemas medidores do tipo resposta (*Response-Type Road Roughness Measurement Systems - RTRRMS*), assim como análises subjetivas realizadas por técnicos avaliadores.

Desta forma, os métodos são separados de acordo com o seu intervalo de amostragem e a acurácia do levantamento, e se enquadram na seguinte ordem:

- Classe 1 – Dispositivos de alta precisão que obtêm diretamente o perfil da rodovia (método Nível e Mira, *Dipstick*; z-250; perfilômetro do TRL; *Walking Profiler* da ARRB – *Australian Road Research Board*, etc.);
- Classe 2 – Métodos perfilométricos (perfilógrafos; equipamentos com sensores a laser, infravermelho ou ultrassom; APL – *Longitudinal Profile Analyser*, etc.);
- Classe 3 – Dispositivos do tipo resposta (integrador de irregularidade longitudinal IPR/USP; *Maysmeter*, MERLIN; *Riley*, etc.);
- Classe 4 – Avaliação subjetiva, realizada por técnicos avaliadores.

Os medidores de perfil ou métodos perfilométricos são chamados assim por medirem diretamente o perfil da superfície do pavimento, produzindo representações das distorções que alteram a dinâmica dos veículos (BASÍLIO, 2002).

Já os Medidores Tipo Resposta realizam a medição da irregularidade de forma indireta, ou seja, produzem uma “percepção” do perfil da rodovia. O

dispositivo de medição é disposto em um veículo que mede o deslocamento acumulado entre a carroceria e os eixos traseiro e dianteiro do mesmo (CUNHA, 2008).

Este tipo de medidor é muito utilizado por apresentar baixo custo, elevada produtividade e fácil operação. Porém, Woodstrom (1990) lista alguns empecilhos em seu uso, como a necessidade de calibração frequente, os desvios das medidas causadas pelos automóveis (que agem como um “filtro” na obtenção dos sinais) e pela velocidade de operação, assim como a dificuldade de se relacionar com os dados obtidos com outros equipamentos.

Sayers e Karamihas (1998) citam que há equipamentos mais indicados para um SGP em nível de rede e outros para o nível de projeto. Para o primeiro, mostra-se suficiente a determinação dos níveis de irregularidade longitudinal em segmentos de trechos de comprimento administrável, porém, para diagnósticos e pesquisas mais detalhadas (nível de projeto) é importante a possibilidade de saber localizar com precisão os pontos da rodovia onde um pavimento apresenta defeitos na superfície.

Dentre os equipamentos e métodos de mensuração disponíveis, existem diversos que atendem as mais variadas necessidades, alguns com maior precisão, porém de alto custo, até os de mais fácil acesso, mas que apresentam menor acurácia.

Assim sendo, a escolha deve considerar a finalidade para a qual os dados serão gerados, o período de tempo e os recursos disponíveis pela agência responsável pela administração rodoviária. Como aponta a norma ASTM E 1777-96, que comenta sobre a priorização de obtenção de dados em um SGP, não existe a obrigatoriedade de utilização de um sistema específico de mensuração para cada situação.

2.4.2 Condições Estruturais

A análise da condição estrutural do pavimento permite estimar a sua capacidade de suporte de carga, assim como a sua vida útil de serviço sob ação de certas condições de tráfego. O parâmetro mais utilizado é a avaliação da deflexão do pavimento, sob efeito de carregamentos diversos (BASÍLIO, 2002).

Conforme o Manual de Gerência de Pavimentos (DNIT, 2011) e Bernucci *et al.* (2008), esta avaliação está associada ao conceito de capacidade de carga, que pode ser relacionado diretamente ao projeto e o dimensionamento do pavimento. Os defeitos estruturais resultam essencialmente da ação do ciclo de cargas e são os causadores das deformações elásticas e plásticas na estrutura. As plásticas são acumulativas durante os anos de serviço de um pavimento e são responsáveis pelo surgimento dos afundamentos permanentes nas trilhas de rodas (Figura 10) medidas pela treliça normatizada. Já as deformações elásticas são avaliadas por equipamentos chamados genericamente de deflectômetros, por medirem as deflexões verticais do pavimento que causam o aparecimento de trincas na superfície do pavimento ao longo do tempo de serviço, levando-o à fadiga.



Figura 10 – Trincamento e afundamento permanente por repetição de cargas.
Fonte: Bernucci *et al.*, 2008.

Os métodos de avaliação estrutural podem ser divididos em destrutivos, semidestrutivos ou não-destrutivos. Os primeiros resultam da remoção de parte das camadas do pavimento para fins de avaliação. Os não destrutivos permitem a análise das condições estruturais sem causar danos permanentes à superfície do pavimento, por meio de ensaios executados no revestimento, em que se avalia a resposta do pavimento a uma carga (HAAS *et al.*, 1994). Já os métodos semidestrutivos, segundo Bernucci *et al.* (2008), são feitos através de aberturas menores, que não comprometem grandes áreas do pavimento, e fazem uso de equipamentos menores e mais portáteis.

2.4.2.1 Métodos Destrutivos

Os métodos destrutivos são aqueles que investigam a condição estrutural de cada camada por meio da abertura de trincheiras e poços de sondagem (Figura 11), onde é possível analisar a espessura das camadas que compõe o pavimento, umidade e tipo dos materiais empregados, realizar ensaios de capacidade de carga *in situ*, assim como obter amostras para ensaios posteriores em laboratório (BERNUCCI *et al.*, 2008).



Figura 11 – Extração de corpos de prova e de poços de sondagem
Fonte: Bernucci *et al.*, 2008.

Por serem demorados, de alto custo e alcance limitado, são pouco utilizados para a avaliação de estruturas de pavimento, sendo restringidos apenas a problemas localizados (HAAS *et al.*, 1994).

2.4.2.2 Métodos Semidestrutivos

Os métodos semidestrutivos são os que fazem uso da abertura de janelas menores no pavimento, que possibilitam a utilização de um instrumento portátil de pequeno porte para avaliar a capacidade de carga de um pavimento, como o uso dos *dynamic cone penetrometer* – DCP, ou cones dinâmicos de penetração, em português. Um exemplo da aplicação deste instrumento pode ser visualizado na Figura 12 (BERNUCCI *et al.*, 2008).



Figura 12 – Exemplo de equipamentos DCP de avaliação estrutural expedita de subsolos e camadas de solo
Fonte: Bernucci *et al.*, 2008.

2.4.2.3 Métodos Não-Destrutivos

Os métodos-não destrutivos são realizados por meio de levantamentos deflectométricos da superfície do pavimento, com a utilização de ferramentas que reproduzem a ação da carga atuante no pavimento (BORGES, 2001).

Ainda segundo Borges (2001), a deflexão, por ser um parâmetro consideravelmente fácil e rápido de ser obtido, tornou-se de uso comum, o que tem levado a tendência de a considerar como um indicador universal de desempenho, sem uma classificação apropriada, particularmente em relação ao tipo de pavimento e processo de deterioração estrutural.

Bernucci *et al.*, (2008) divide os equipamentos utilizados em avaliações não destrutivas (NDT – *nondestructive deflection testing*) em três categorias:

- Carregamento quase-estático – ensaio de placa e viga Benkelman;
- Carregamento vibratório – *dynalect*;
- Carregamento por impacto – *falling weight deflectometer* (FWD).

Os valores numéricos de avaliação estrutural apresentam grande variação entre os obtidos por cada um destes métodos que podem ser usados para levantamentos da condição de pavimentos para sistemas de gerência em nível de rede, para análises de rotina ou para projeto de reabilitação (BERNUCCI *et al.*, 2008), e todos necessitam de uma calibração por processos específicos e seguem rotinas de aplicação determinadas pelo tipo de carregamento (ASTM, 2015).

No Brasil, os métodos de medição de deflexão mais aplicados são de duas gerações distintas, o FWD e a viga Benkelman, criados nas décadas de 1980 e 1950, respectivamente (CUNHA, 2008).

O equipamento FWD (Figura 13) é o mais atual usado na medida dos deslocamentos elásticos de um pavimento. São compostos pelo impacto da queda de um peso suspenso a uma certa altura, sobre amortecedores que comunicam o choque a uma placa metálica apoiada sobre o pavimento no ponto de leitura da deflexão máxima. A intensidade da carga é controlada pela altura de queda e pelo valor da massa. São registradas as deflexões máximas no centro da placa e as variações de distâncias por meio de sismômetros fixados a uma barra, permitindo a medida da bacia de deflexão (HAAS *et al.*, 1994).

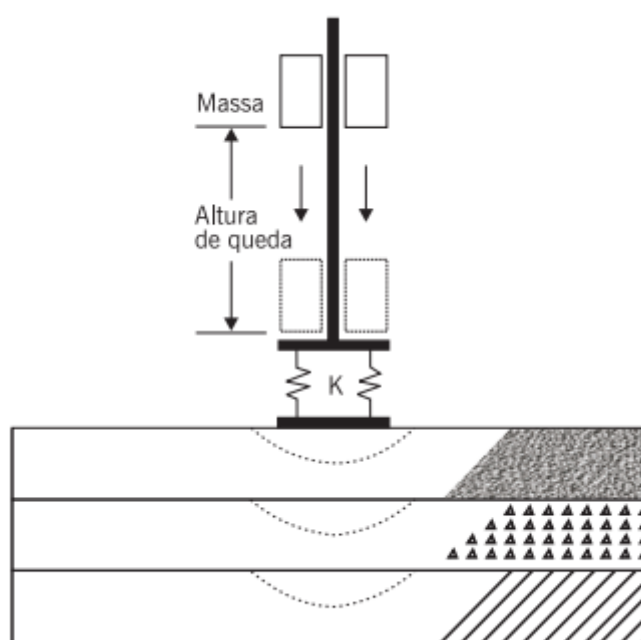
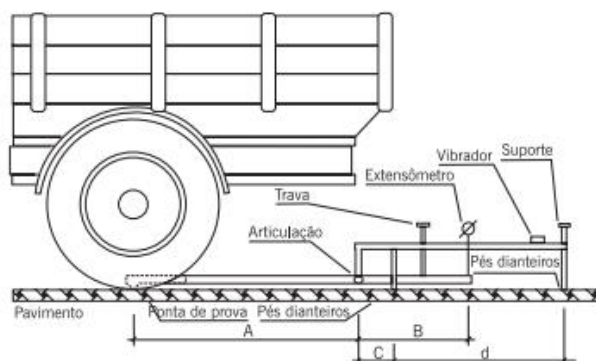


Figura 13 – Esquema de um deflectômetro de impacto - FWD
Fonte: Bernucci *et al.*, 2008.

Segundo Cunha (2008), a viga Benkelman era aplicada em larga escala em todo o meio rodoviário pelo mundo, até que as gerações de equipamentos mais sofisticados e adequados, como o FWD, passaram a ganhar espaço.

A viga Benkelman (VB) (Figura 14) consiste de um equipamento muito simples que necessita de um caminhão com eixo traseiro simples de roda dupla com carregamento de 8,2 tf – simetricamente distribuído entre as rodas (DNER, 94), para que seja possível a aplicação da carga sob a qual será medida a deformação elástica.

O ensaio consiste em colocar a ponta de prova entre os pneus das rodas geminadas do caminhão - alocando-a exatamente no seu eixo, fazer a leitura inicial do extensômetro que se situa a uma distância do operador sobre o braço móvel da viga e então fazer o caminhão se afastar lentamente até 10 metros de distância da ponta de prova, ou até que o extensômetro não consiga mais realizar medições. A leitura final do extensômetro corresponde ao descarregamento e o deslocamento recuperado é relacionado à deformação elástica do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).



(a) Esquema da viga Benkelman (DNER ME 24/94)



(b) Medida com viga Benkelman em campo

Figura 14 – Esquema da viga Benkelman (DNER-ME 24/94) e exemplo de medida em campo

Fonte: Bernucci *et al.*, 2008.

O equipamento *falling weight deflectometer* apresenta algumas vantagens em relação à VB, que são, como listados por Bernucci *et al.* (2008):

- Precisão nos valores obtidos pelas medições;
- Variedade de níveis de carga de aplicação;
- Produtividade maior;
- O ensaio realizado não sofre influência pela ação do operador.

Para que seja válida a utilização de métodos distintos de medição de deflexão, faz-se necessária a informação da relação entre as medidas obtidas por estes equipamentos e a comparação de seus resultados.

2.4.3 Condições Operacionais

Um dos fatores determinantes para a eficácia de um SGP é a informação do tráfego atuante em cada um dos trechos avaliados, a sua taxa de crescimento, logo, também a previsão de tráfego no futuro. Para que seja criado um banco de dados de boa confiabilidade, é fundamental que sejam estabelecidos critérios de contagem e de pesagem de veículos, de forma a possibilitar a demanda e o crescimento do tráfego (DNIT, 2011).

Para traçar a estratégia de intervenções, como o dimensionamento do reforço, é preciso realizar a estimativa do tráfego futuro. Para todos os casos, torna-se válido e desejável definir os seguintes itens relativos ao tráfego: Projeção do VMDA (Volume Médio Diário Anual), carregamento da frota e número N (DNIT, 2006).

2.4.3.1 Volume Médio Diário Do Tráfego (VMD)

O VMD indica o valor total de automóveis que diariamente solicitam um determinado trecho rodoviário em um sentido, ou seja, é um parâmetro determinante das necessidades da rodovia em termos de capacidade de tráfego (DNIT, 2011).

O diagnóstico do volume de tráfego deve ter base em séries históricas e também em contagens volumétricas classificatórias no trecho avaliado. Também

devem ser considerados os desvios de tráfego significativos, para a definição de segmentos homogêneos em termos de tráfego (DNIT, 2006).

Para que seja definido o tráfego no futuro, a avaliação do tráfego atual é tomada como base. Algumas das maneiras de projeção do tráfego futuro são as análises de séries históricas existentes e a associação a dados socioeconômicos regionais.

Faz-se necessária também a consideração da existência dos diversos tipos de automóveis, variando tamanho e carga, necessitando-se de uma classificação adequada do tráfego na rodovia avaliada, dando-se a devida atenção aos veículos de carga.

2.4.3.2 Carregamento Da Frota

Para se avaliar os efeitos do tráfego na estrutura do pavimento é preciso estimar os carregamentos dos eixos com os quais os veículos o solicitam. O levantamento destes valores pode ser feito nos postos de pesagem. A fim de converter os dados do tráfego misto em um valor equivalente de operações de eixo padrão, são utilizados os Fatores de Equivalência de Cargas (FC). Tais fatores possibilitam converter o eixo solicitado por uma determinada carga em um número de aplicações do eixo-padrão que produz um efeito equivalente (DNIT, 2006).

2.4.3.3 Número N

O número N expressa a contagem de repetições de cargas equivalentes ao eixo simples de rodas duplas de 8,2 tf, tomado como eixo padrão, e define as necessidades estruturais dos pavimentos para um determinado período de solicitação pelo tráfego (DNIT, 2011).

2.5 DETERMINAÇÃO DE PRIORIDADES

A determinação das prioridades de intervenção é o objetivo principal da criação e implementação de um Sistema de Gerência de Pavimentos, que busca a otimização da utilização de seus recursos (DNIT, 2011).

Esta otimização tem base na intenção de maximizar os benefícios ou minimizar os custos sob restrições. Levando em consideração as necessidades de toda a rede, são confrontados estes benefícios e custos para as alternativas de manutenção, tornando possível a identificação da opção que produzirá o maior custo-benefício, em um determinado período de avaliação (BASÍLIO, 2002).

2.6 PROGRAMA PLURIANUAL DE INVESTIMENTOS

Conforme o Manual de Gerência de Pavimentos (DNIT, 2011), o Programa Plurianual de Investimentos possui como objetivo obter o resultado da avaliação econômica empreendida e compõe o produto mais importante da aplicação de um Sistema de Gerência de Pavimentos.

2.7 DADOS NECESSÁRIOS PARA A AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS

Os dados necessários à elaboração e implementação eficaz de um Sistema de Gerência de Pavimentos são aqueles que objetivam individualizar os pavimentos em relação aos aspectos das condições funcional, estrutural e operacional e também à caracterização física da rodovia.

Conforme o Manual de Gerência de Pavimentos do DNIT (2011), as informações necessárias para um SGP eficaz são:

- a. Características físicas
 - Tipo do pavimento;
 - Dimensões da plataforma da rodovia;
 - Número de faixas de tráfego;
- b. Características operacionais
 - Volume de tráfego diário (VMD);
 - Velocidade limite;
 - Número N;
- c. Características da estrutura dos pavimentos
 - Tipo e espessura do revestimento existente;

- Tipo e espessura do revestimento anterior;
 - Data da construção;
 - Data da última reabilitação;
 - Data do último tratamento preventivo;
 - Número estrutural;
 - Tipo, espessura e coeficiente estrutural de cada camada do pavimento;
- d. Dados de avaliações dos pavimentos
- Índice de Irregularidade Internacional (IRI);
 - Deflexão (Viga Benkelman ou FWD).

2.8 HISTÓRICO DA MENSURAÇÃO DE PAVIMENTOS

Segundo Gillespie (1992), com a introdução de veículos movidos a gasolina na virada do século XX, aumentou o número de pessoas com acesso a viagens particulares mais rápidas. Junto a este fato, também cresceu o interesse na construção e manutenção de rodovias pavimentadas que proporcionassem um rolamento mais suave.

A medição da irregularidade dos pavimentos tem sido uma das principais preocupações dos engenheiros rodoviários desde o início do século passado. Essa irregularidade é percebida como “qualidade de rolamento” pelo usuário (LESS, 1974).

Segundo Less (1974) os mais antigos meios gráficos de registrar a irregularidade longitudinal possuíam variados formatos. Por volta do ano 1900 o instrumento chamado “*Viagraph*” foi desenvolvido por um engenheiro irlandês. O “*Viagraph*” se tratava de um equipamento bastante rudimentar, que consistia de uma régua de madeira com doze pés de comprimento e um marcador gráfico, a qual era arrastada longitudinalmente sobre a rodovia. Este equipamento tentava medir a irregularidade através do registro contínuo em papel do desvio no ponto central da régua (GILLESPIE, 1992).

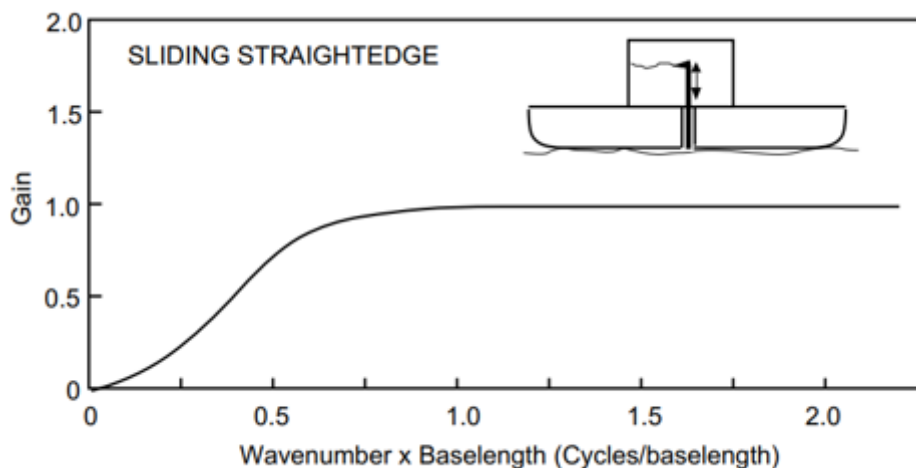


Figura 15 – Representação da leitura do medidor “Viagraph”
Fonte: Gillespie, 1992.

A resposta da leitura é representada pelo crescimento da curva (Figura 15), sendo perceptível em comprimentos de onda iguais ou menores que a base da régua, visto que comprimentos maiores não produziam respostas, ou seja, para essa medição, seria necessário um *Viagraph* cada vez maior, tornando o uso desajeitado e inconveniente (GILLESPIE, 1992). A irregularidade medida por este equipamento era dada pelo somatório de desvios verticais em relação à distância percorrida, a mesma unidade utilizada atualmente utilizada no IRI.

O *Viagraph* apresentava algumas desvantagens como o desgaste da régua provocada pelo arraste, além de sua limitação de medição. O primeiro foi resolvido com a adição de duas rodas, uma em cada extremidade do instrumento, resultando na régua móvel (Figura 16). Neste caso, pelo fato de serem utilizados somente dois pontos de apoio nas extremidades, a resposta do equipamento tornou-se variável de acordo com o seu posicionamento, seu comprimento total e o comprimento de onda pelo caminho onde era utilizado. Devido ao contato da régua com a superfície em três pontos, alguns comprimentos de onda eram medidos três vezes, tendo sua amplitude duplicada, ao passo que outros comprimentos eram completamente ignorados.

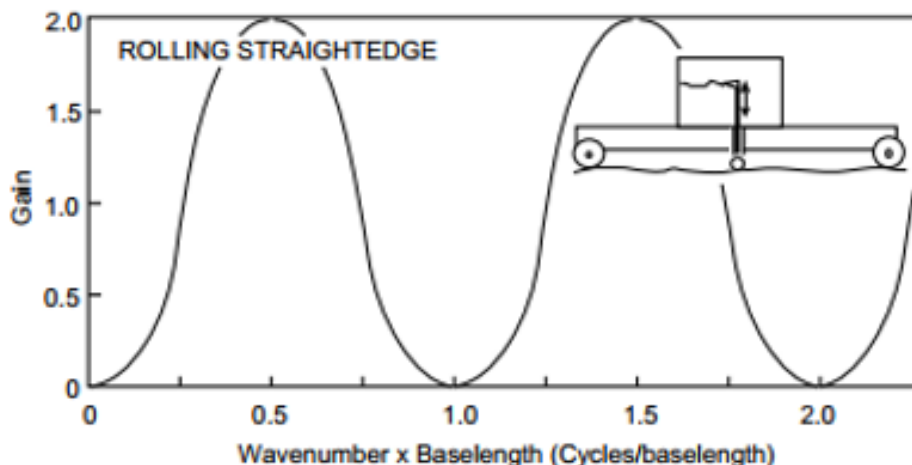


Figura 16 – Resposta da leitura do medidor de régua móvel
Fonte: Gillespie, 1992.

Desta forma, foram adicionadas matrizes de rodas a essa ferramenta, com a finalidade de estabelecer um plano de referência para serem medidos e comparado com os desvios verticais. O arranjo definia uma elevação média entre todos os pontos sob as rodas e a irregularidade era dada através do desvio da roda central em relação a este plano de referência. Tal processo culminou na criação dos perfilógrafos (Figura 17). A ideia era de que, quanto mais rodas, mais o equipamento se comportaria como o *Viagraph*, sem alguns dos seus inconvenientes. Contudo, devido a variação nas respostas de cada um destes instrumentos, tornou-se claro que o avanço a um padrão de medidas de irregularidade não era suficiente (GILLESPIE, 1992).

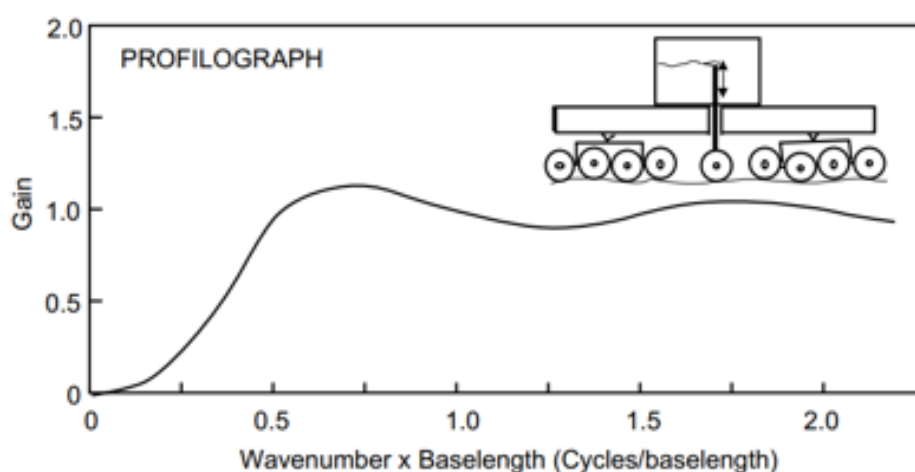


Figura 17 – Representação da leitura do medidor perfilógrafo
Fonte: Gillespie, 1992.

Mesmo com o desenvolvimento dos chamados perfilógrafos de rodas (denominados assim por registrarem graficamente os perfis longitudinais), ainda

não eram uma opção de grande viabilidade, pois tais instrumentos apresentavam baixa produtividade, visto que eram operados em velocidades baixas e possuíam dificuldade de transporte. De acordo com Barella (2008), este tipo de equipamento não se mostra muito adequado para levantamento de perfis, pois eles não podem medir comprimentos de onda harmônicos a seu vão (por exemplo: $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, etc.).

Ainda de acordo com Barella (2008), alguns dos perfilógrafos mais conhecidos são: o *Rainhart*, o *Rolling Straightedge*, o perfilômetro do TRRL, o *Ames* e o perfilógrafo Califórnia. Este último sendo o mais popular dos perfilógrafos nos EUA, segundo Smith *et al.* (1997).

Segundo Gillespie (1992), por volta dos anos 1920, os engenheiros de rodovias já haviam reconhecido a relevância da irregularidade dos pavimentos como uma das causas da vibração nos veículos com motores a gasolina. Isto ficou mais evidente após o desenvolvimento do “Via-Log” pelo Estado de Nova Iorque, colocado em serviço público em 1926 pelo *Bureau of Public Roads* - BPR. Este equipamento, que pode ser considerado como precursor dos medidores do tipo resposta, utilizava o deslocamento da suspensão do veículo como indicador do nível de irregularidade do pavimento (LAY, 1992).

Os primeiros modelos deste tipo de equipamento registravam a movimentação da suspensão, mas logo foram modificados para realizar a soma deste movimento em um contador mecânico, o que permitia que se chegasse em uma medida estatística na unidade de polegadas/milha (GILLESPIE, 1992).

Mesmo assim, devido à dinâmica e estrutura diferentes para cada tipo e modelo de veículo, este método se mostrou ineficiente em gerar dados consistentes, o que levou a tentativa nas décadas seguintes de criação de um veículo “padronizado”.

Com este intuito, em 1925 foi desenvolvida a evolução do Via-Log (PERERA e KOHN, 2002). Tratava-se do *BPR Roughometer*, que ganhou a configuração mostrada na Figura 18 no ano de 1941 pelo *Bureau of Public Roads*, mais tarde conhecido como FHWA – *Federal Highway Administration*, dos EUA, segundo Gillespie (1992).

A principal novidade deste equipamento era a simulação de uma roda de um carro de passeio. O *Roughometer* era um reboque de roda única, no qual todas as dimensões, propriedades de massa, roda e suspensões eram padronizados, para se alcançar resultados de performance comparáveis em todos os exemplares do equipamento (GILLESPIE, 1992).

No *Roughometer* o deslocamento da roda é registrado por um integrador acoplado a um contador elétrico. O reboque deve ser conduzido a uma velocidade de 20 mph, e um dos detalhes deste modelo é que o registro deste deslocamento só é realizado em uma direção, que então são somados pelo contador elétrico. O valor que este equipamento gera é chamado de Índice de Irregularidade (*Roughness Index*), e é dado em polegadas por milha (BARELLA, 2008).

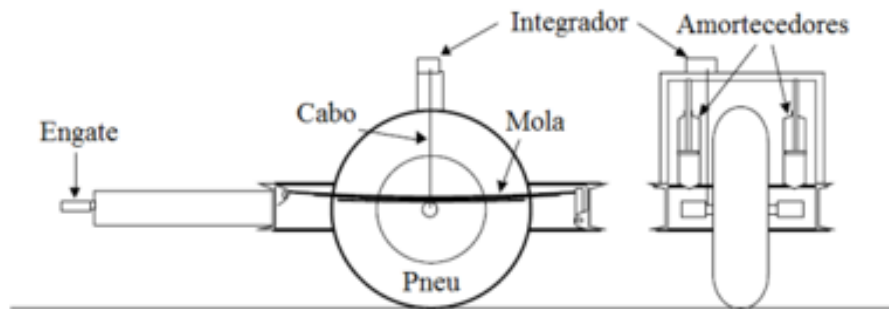


Figura 18 – BPR Roughometer
Fonte: Adaptado de Gillespie, 1992.

Porém, como diz Paterson (1987), o *BPR Roughometer* não era um equipamento robusto o suficiente para ser utilizado em rodovias com altos níveis de irregularidade. Durante a época dos experimentos realizados no AASHO *Road Test* foi desenvolvido o perfilômetro CHLOE, outra importante ferramenta de mensuração de irregularidade, que leva este nome devido às iniciais dos engenheiros que trabalharam no seu desenvolvimento: “**C**arey, **H**utckins, **L**athers and **O**thers **E**ngineers”. A Figura 19 traz uma imagem do perfilômetro durante o AASHO *Road Test*.

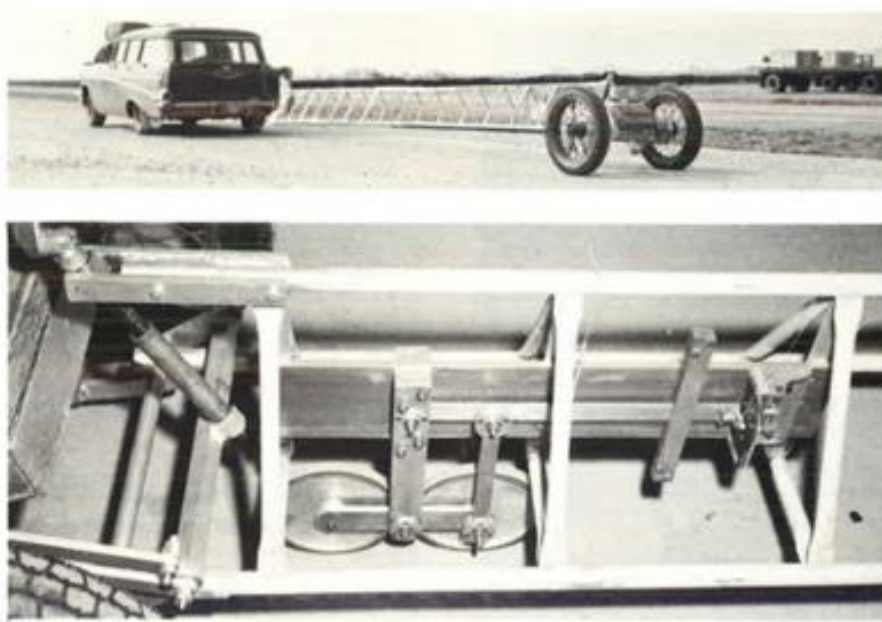


Figura 19 – Perfilômetro CHLOE
Fonte: AASHO Road Test Report 7.

Bottura (1998) e Gillespie (1992) descrevem o equipamento em detalhes. O perfilômetro faz uso de um pêndulo para determinar um plano fixo de referência. O CHLOE era constituído de uma carreta conduzida por um veículo de passeio a 3 km/h, na qual eram montadas duas pequenas rodas de medição distanciadas a aproximadamente 23 cm uma da outra, atreladas a um sistema de medição, composto por um integrador responsável por medir e registrar a inclinação local da estrada em relação ao plano de referência (Figura 20). O valor estatístico registrado era chamado de “Variação de Inclinação” ou “Variância da Declividade Longitudinal”, dado em polegadas por milha.

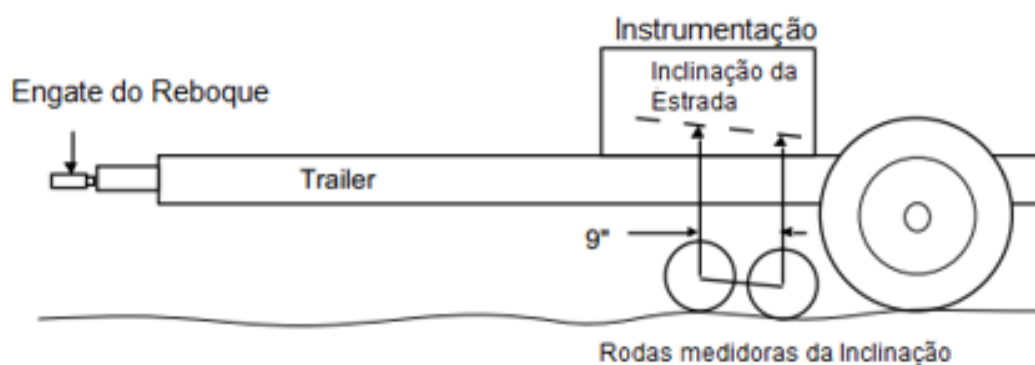


Figura 20 – Configuração do perfilômetro CHLOE
Fonte: Gillespie, 1992.

Este sinal de variação de inclinação da superfície da via, registrado pelo perfilômetro CHLOE, foi de grande importância para os engenheiros rodoviários na época, pois foi a referência utilizada para desenvolver o já citado conceito de Serventia-Desempenho, criado por Carey e Irick na década de 1960. Embora tenha dado essa grande contribuição, o perfilômetro CHLOE caiu em desuso desde então (GILLESPIE, 1992).

Segundo Bottura (1998), foi também nos anos 60 que outros equipamentos do tipo resposta derivados do *Via-log* e do *BPR Roughometer* começaram a surgir, ganhando novos fabricantes e se tornando populares.

De acordo com Gillespie (1992), estes equipamentos, chamados de “*roadmeters*”, surgiram do interesse crescente em criar uma ferramenta eficiente de medição de irregularidade auxiliada de um veículo em movimento, para aumentar a produtividade. Sendo os mais populares destes: o *Mays Road Meter* (*Mays Meter*), o *PCA Meter*, e o *Bump Integrator*. Tais medidores ficaram conhecidos como Sistemas Medidores de Irregularidade Rodoviária do Tipo Resposta (*Response-Type Road Roughness Measurement Systems – RTRRMS*), ou medidores do tipo resposta.

Os três equipamentos citados têm seu funcionamento com base na medição contínua do deslocamento vertical da suspensão de um automóvel, ou mesmo de um reboque, em relação à sua carroceria, e assim como o *Roughometer*, somente realizam a soma em um sentido: apenas quando o eixo se afasta da carroceria ou quando o eixo se aproxima dela, e geram o valor em termos de polegadas/milha ou m/km (BOTTURA, 1998).

Devido ao seu baixo custo, a maioria destes equipamentos poderia ser montado em qualquer veículo disponível, como mostrado na Figura 21. O *PCA meter* se diferencia dos outros por dar maior importância a grandes deslocamentos, porém, também pode ser usado para simplesmente acumular as variações das cotas verticais, como os outros medidores (GILLESPIE, 1992).

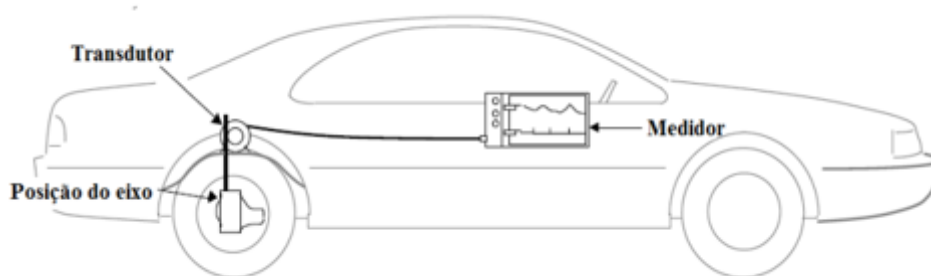


Figura 21 – Ilustração esquemática de um Sistema Medidor Rodoviário do Tipo Resposta
Fonte: adaptado de Gillespie, 1992.

Graças ao seu baixo custo e simplicidade, os medidores do tipo resposta foram vastamente nos EUA, durante a década de 1970. Mesmo sendo capazes de gerar valores confiáveis de irregularidade em estradas ruins e também em pavimentos suaves, estes instrumentos não apresentavam precisão suficiente para a maiores das aplicações na engenharia. Como era esperado, devido as diferentes dinâmicas em cada modelo de veículo, não existiam dois medidores do tipo resposta com medidas idênticas, assim como também existiam problemas em se manter a mesma performance com o passar do tempo, mesmo quando se analisava cada um individualmente. Ações comuns como adição de combustível ou passageiros, ajuste na pressão dos pneus ou balanceamento destes, entre outros, alteravam a “calibração” do equipamento. Isto resultou na dificuldade do desenvolvimento e alimentação constante de um banco de dados de irregularidade de pavimentos, sem um esforço contínuo em se controlar ou compensar as alterações constantes nos veículos, devido a rotineira necessidade de calibrar os dispositivos utilizados (GILLESPIE, 1992).

Devido a existência de dinâmicas individuais de funcionamento, como velocidades de uso e características próprias quanto à acurácia do sensor de deslocamentos, são gerados erros durante a medição da irregularidade, variando para cada um dos modelos de medidores tipo resposta. Para Gillespie *et al.* (1980), tais erros não geram grandes problemas para levantamentos em gerenciamento em nível de rede, quando se trabalha com distâncias médias a fim de se avaliar as estatísticas da situação de toda a rede rodoviária. Contudo, estes erros aleatórios limitam a capacidade de utilização desta classe de equipamento para medições em segmentos de trechos individuais, importantes

para a tomada de decisão de investimentos em atividade de manutenção ou para a avaliação da qualidade, e também na análise de construção de novas estradas.

Na década de 1960, com o desenvolvimento da ideia do perfilômetro inercial e da criação do primeiro exemplar, o Perfilômetro GMR – *General Motors Research*, por Elson Spangler e William Keller, nos laboratórios da GM - *General Motors*, houve uma grande evolução na capacidade de medição da irregularidade longitudinal, possibilitando mais rendimento e precisão na coleta de dados, para a administração de grandes malhas rodoviárias (SAYERS e KARAMIHAS, 1998).

Como explica Barella (2008), este perfilômetro inercial passou por diversas modificações, até ser conhecido como perfilômetro GMR. Era formado por uma roda apalpadora suportada por uma haste inclinada, separada das rodas do veículo, que exerciam contato contínuo com o pavimento. Com o registro da aceleração vertical da carroceria do automóvel e do movimento da haste, era possível levantar o perfil longitudinal do pavimento.

Estes perfis passavam por um simulador que tentava reproduzir as condições de passagem de um quarto de carro, contendo basicamente um conjunto composto por massa, mola, amortecedor e pneu (Figura 22), similar ao medidor BPR *Roughometer*, com o intuito de obter dados estatísticos relacionados à irregularidade longitudinal dos pavimentos. Na literatura, em inglês, este processo foi chamado de *Quarter-car-Simulation* – QCS, e o índice gerado por este experimento foi nomeado como *Quarter-Car-Index* – QI, expresso em unidades de comprimento por comprimento (GILLESPIE *et al.*, 1986).

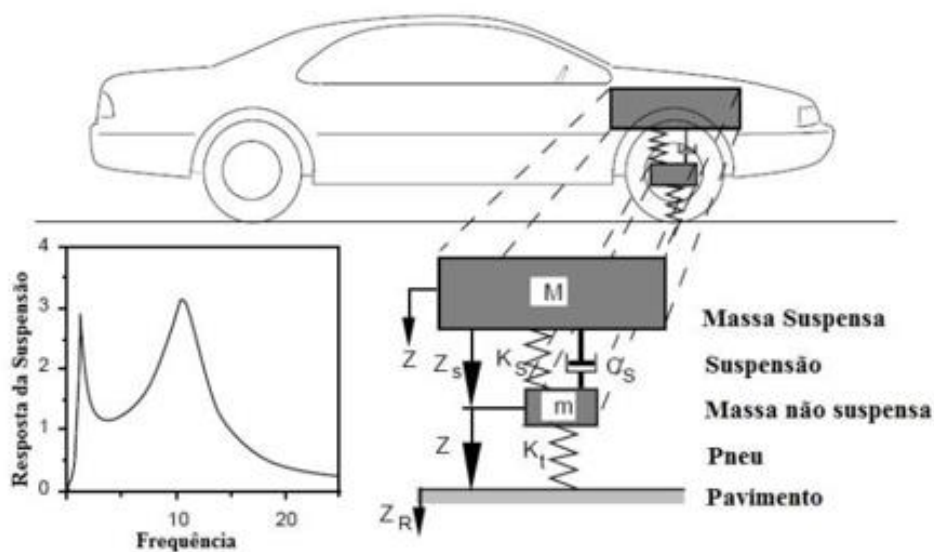


Figura 22 – Configuração do modelo Quarto de Carro e gráfico de resposta da suspensão em diferentes frequências.
Fonte: Adaptado de Gillespie, 1986.

Mesmo com o desenvolvimento do QI, considerando-se que cada modelo de quarto de carro possuía características próprias para cada conjunto de massa, mola, amortecedores e pneus, assim como cada carro responde de uma maneira única a cada imperfeição do pavimento, os valores de saída não eram tão fiéis quanto os obtidos por um *BPR Roughometer*. Também é válido mencionar que, por se tratar de um modelo matemático de quarto de carro, os valores gerados pelo GMR depois do perfil longitudinal passar pelo simulador, não eram iguais aos medidos com o próprio BPR, portanto, não se podia chamar o resultado pelo mesmo nome (BARELLA, 2008).

Para solucionar este problema, o Banco Mundial propôs experimentos que, não só objetivavam avaliar por meio de testes os medidores do tipo resposta mais populares naquele momento, como também gerar interesse na busca por uma unidade de medida de irregularidade comparável (para a utilização em modelos de custos rodoviários). Estavam em busca de uma escala de irregularidade padrão, que fosse estável ao longo do tempo e passível de reprodução, para que fosse possível realizar a comparação das medições obtidas através de diversos equipamentos diferentes em todo o mundo.

Considerando a necessidade de calibração e correlação, foram realizados testes em 1982, no chamado *International Road Roughness Experiment* – IRRE, conduzidos no Brasil por equipes brasileiras, inglesas,

francesas, belgas e norte americanas, que teve papel determinante neste projeto e foi considerado um marco mundial em termos de avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos. Durante os experimentos foram empregadas avaliações controladas de irregularidade em um dado número de estradas em variadas condições, assim como diferentes métodos e equipamentos. Este experimento resultou no desenvolvimento do Índice de Irregularidade Internacional (IRI – *International Roughness Index*) (SAYERS *et al.*, 1986).

O IRI é uma medida de irregularidade padronizada relacionada aos sinais obtidos pelos equipamentos do tipo resposta (RTRRMS) com as seguintes unidades recomendadas: metros por quilômetros (m/km), milímetros por metros (m/mm) ou inclinação vezes 1000. Tal índice teve como referência o modelo quarto-de-carro, porém, com uso de parâmetros de um veículo escolhido. A medida obtida pelo RTRRMS é chamada de média retificada de inclinação (ARS - *Average Rectified Slope*) (SAYERS *et al.*, 1986).

Voltando um pouco no tempo, em 1968, foi desenvolvido o equipamento chamado de APL – Analisador de Perfil Longitudinal, o desenvolvimento francês mais representativo da área. Projetado pelo tradicional LCPC - *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (Laboratório Central de Pontes e Estradas), como um equipamento rebocável de uma roda só, capaz de gerar resultados que representam a resposta do perfil longitudinal do pavimento sobre o equipamento, conforme Sayers *et al.* (1986) e Barella (2008).

O equipamento francês (Figura 23) deve ser atrelado a um veículo em velocidade constante. Os valores obtidos pelo APL são registrados por um dispositivo inercial mecânico calibrado nos laboratórios do LCPC através de simuladores de vibração. Atualmente o equipamento foi modernizado, passando a utilizar um acelerômetro no lugar do sistema mecânico (BARELLA, 2008).

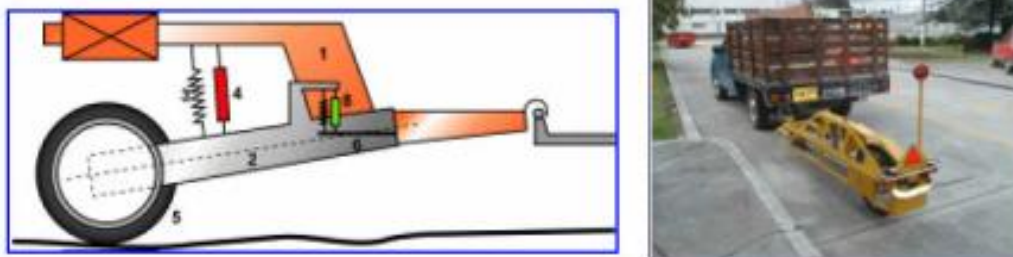


Figura 23 – Desenho esquemático e fotografia do equipamento APL.
Fonte: Barella, 2008.

A norte-americana *Phoenix Scientific Inc.* desenvolveu o *Pavement Profile Scanner – PPS 2000*, no ano de 2002, visualizado na Figura 24. Fazendo uso de um feixe de laser junto a um espelho, o sensor consegue medir simultaneamente os perfis transversal e longitudinal do pavimento, obtendo mil resultados por segundo. Este equipamento também possui outras utilizações, como a identificação de outros defeitos, como trincas e panelas, falhas em juntas do concreto, etc. Durante os anos seguintes outras empresas também começaram a fabricar equipamentos semelhantes (PHOENIX SCIENTIFIC INC., 2004).

O *Pavement Profile Scanner* é o principal produto da *Phoenix Scientific Inc.* O PPS 2000 é constituído de um *scanner* poligonal de seis lados, usados para medir pontos em linha reta no pavimento, gerando seis linhas de leitura por rotação do polígono. Operando a 10000 rotações por minuto, o sistema gera 1000 leituras por segundo. Com o *scanner* montado a aproximadamente 2,10 metros de altura, o campo de visão inclinado a 45 graus gera um perfil com aproximadamente 4,20 metros. (PHOENIX SCIENTIFIC INC., 2004).



Figura 24 – Medidor PPS-2000
Fonte: Phoenix Scientific Inc., 2004.

Para que seja efetuado um estudo de precisão adequado, que utilize um índice de irregularidade de referência, é necessário o uso de métodos capazes de medir comprimentos de onda que o índice selecionado compreende. Para o índice foco dessa pesquisa, o IRI, essa faixa fica entre 1,3 e 30 metros. Para estes casos, pode-se utilizar um *Dipstick* ou o método de Nível e Mira (KARAMIHAS, 1999).

Já para realizar a calibração dos medidores do tipo resposta nestas situações, alguns equipamentos podem ser utilizados para se obter valores de irregularidade de referência. Estes índices são obtidos por métodos que realizam a medição direta do perfil do pavimento, como: Nível e Mira, *Dipstick*, z-250, perfilômetro do TRL, perfilômetro *Walking Profiler* da ARRB, entre outros.

O método de Nível e Mira (Figura 25) é o mais disponível internacionalmente, e também o utilizado para índices de irregularidade de referência nesta pesquisa. Mostra-se de baixa produtividade, por ser demorado e trabalhoso, geralmente utilizado para calibrar outros equipamentos mais eficientes, principalmente os do tipo resposta, de acordo com a norma DNER-ES 173/86. Para estes casos, o levantamento topográfico deve ser realizado nas trilhas de roda interna e externa, a cada 50 cm.

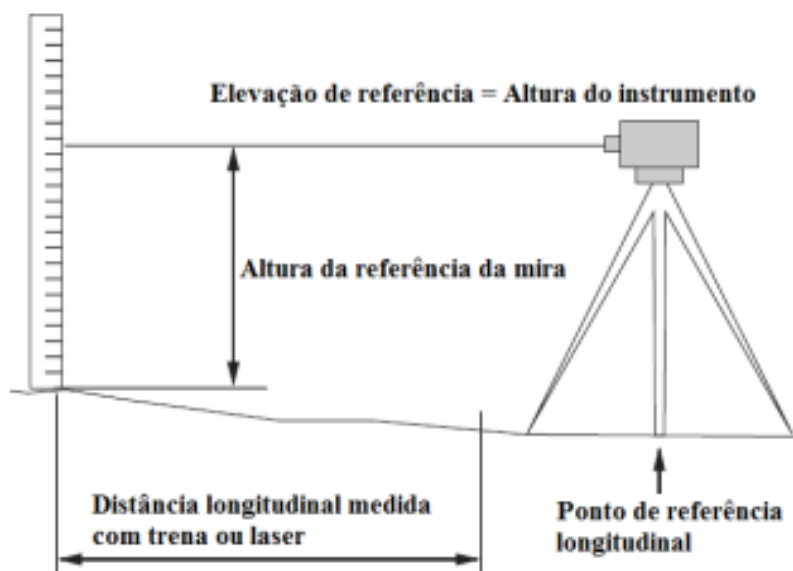


Figura 25 – Ilustração esquemática do método Nível e Mira.
Fonte: Adaptado de Sayers e Karamihas, 1998.

Desenvolvido e produzido nos EUA, o *Dipstick* (Figura 26, esq.) foi criado para medir a planicidade de pisos de concreto de uma forma mais prática, com o intuito de substituir o método de Nível e Mira, pela *Face Companies* (2005).

Embora não se possa definir em qual ano foi desenvolvido, quando se fala de perfilômetros portáteis, o *Dipstick* pode ser considerado como o precursor desse tipo de equipamento, que cresceu em números nos anos 90. Outros instrumentos simplesmente copiados foram fabricados, como é o caso do z-250, porém, alguns com inovações também foram criados, sendo exemplo o *Walking Profiler* da empresa *ARRB Group Ltd* (2005), um dispositivo leve que é operado por uma única pessoa, como pode ser observado na Figura 26 dir. (BARELLA, 2008).

O *Dipstick* também é guiado por um único operador (Figura 26, centro) , o que já se apresenta como uma vantagem quando comparado ao método de Nível e Mira. Para realizar a mediação da inclinação, basta girar o aparelho, cujo corpo é ligeiramente menor que uma caixa de sapato, sobre os seus pés, apoiar novamente as pernas do aparelho no pavimento, e aguardar 2 segundos entre cada giro. Já o *Walking Profiler*, em termos de praticidade se mostra ainda melhor que o *Dipstick*, é utilizado para verificar a condição de pavimentos novos ou recentemente restaurados (BARELLA, 2008).



Figura 26 – Dipstick (esq.); Dipstick em uso (centro); e Walking Profiler (dir.).
Fontes: Face Companies, 2005; e ARRB Group Ltd, 2005.

Outro dos equipamentos desenvolvidos para medição da irregularidade longitudinal foi o MERLIN – *Machine for Evaluating Roughness Using Low-cost Instrumentation*. O medidor é considerado de classe 3 (tipo resposta), criado pelo

laboratório britânico TRL – *Transport Research Laboratory*, com o objetivo de ser um dispositivo simples e barato, diminuindo custos e aumentando as possibilidades de gerenciamento em países em desenvolvimento. Visto que a bibliografia pesquisada não revela exatamente quando o MERLIN foi desenvolvido, mas como um dos primeiros trabalhos publicados sobre ele é de 1991, pode-se considerar que o equipamento não tenha sido criado muito antes deste ano (BARELLA, 2008).

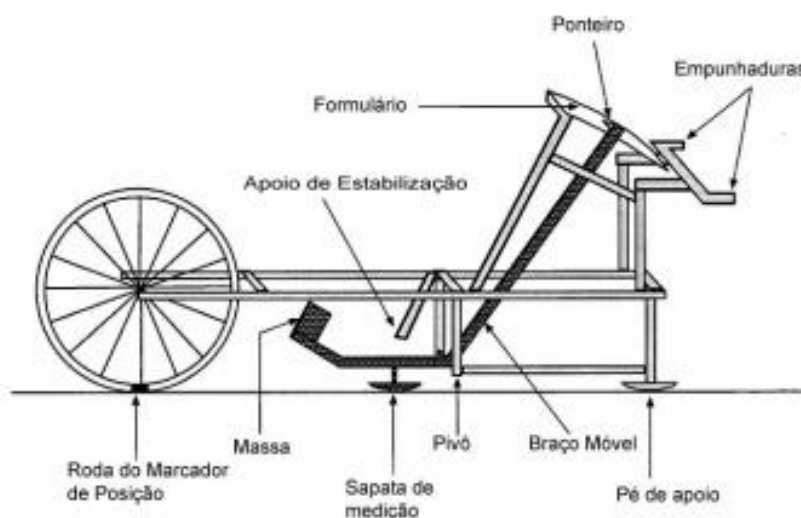


Figura 27 – Desenho esquemático do equipamento MERLIN
Fonte: Barella, 2008.

O instrumento pode ser operado por uma pessoa que vai caminhando e parando para fazer o registro das medidas em intervalos regulares. O MERLIN possui uma configuração parecida com a de um bicicleta, é composto por uma estrutura metálica de 1,80 metro de comprimento, uma roda dianteira – roda marcador de posição, um pé de apoio traseiro e uma sapata de medição que repousa sobre a superfície do pavimento (Figura 27). A sapata está ligada a um braço móvel que se desloca ao longo de um gráfico criado pelos movimentos do dispositivo de medição. O gráfico gera valores que podem ser traduzidos em termos de IRI (CUNDILL, 1991).

2.9 O USO DE SMARTPHONES PARA A MEDIÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS

Atualmente, os dispositivos de telefonia móvel vêm equipados com uma gama de sensores, que buscam deixar a sua interface e utilização mais convenientes. Vários são os exemplos de aplicativos utilizados para diversos fins, incluindo a área de transportes, como a navegação e transporte público, como o *Moovit*, *Waze* e *Google Maps* – estes dois últimos tendo diversas utilizações, como sistema de mapas, possibilidade de traçar e acompanhar rotas e a condição do tráfego em tempo real, etc. – e outros, como o *Uber* e o 99 Taxi, duas das aplicações mais populares no transporte particular. Tais sensores também possuem a capacidade de serem utilizados em outras áreas.

O uso desses dispositivos para a coleta de dados sobre a condição superficial das rodovias apresenta um grande potencial, visto que grande parte dos modelos atuais apresentam maior capacidade de processamento, com diferentes sensores, como os sistemas de posicionamento global (GPS), o sensor de movimento (acelerômetro), magnetômetro, barômetro e giroscópio (DEL ROSARIO *et al.*, 2015).

Alguns destes sensores, como o acelerômetro e o GPS estão presentes em equipamentos medidores mais sofisticados. Logo, a utilização destes dispositivos se mostra uma alternativa promissora, devido ao seu baixo custo e facilidade de uso, além de ser um item cada vez mais comum entre a população (DOUANGPHACHANH e ONEYAMA, 2014).

A literatura que explora diretamente a capacidade dos smartphones para estimar valores de irregularidade é escassa, visto que a maioria dos trabalhos na área objetivou a avaliação de panelas e outros defeitos localizados em pavimentos urbanos (DOUANGPHACHANH e ONEYAMA, 2014).

A utilização destes dispositivos móveis para a avaliação da irregularidade pode ser tratada como um sistema medidor do tipo resposta, já que não realizam a medição direta do perfil da superfície, mas também se distinguem de outros métodos desta classe por não somar os desvios da carroceria em relação ao eixo do veículo, e sim as acelerações verticais com o dispositivo fixado internamente – que possuem correlação com o IRI. Como comentam Sayers e

Karamihas (1998), a aquisição de valores de aceleração vertical com frequência próxima às acelerações da carroceria de um automóvel tem alta correlação com as vibrações sentidas pelos usuários durante uma viagem.

O registro dessas acelerações é realizado através do acelerômetro existente no aparelho, que obtém os valores nos eixos x, y e z em diversos pontos. Aceleração é mais do que uma variação na velocidade. Se pegarmos um objeto e o lançarmos horizontalmente, podemos perceber como a sua velocidade horizontal gradualmente se torna vertical. Como a aceleração é a variação de velocidade em relação ao tempo, e a velocidade é uma quantidade vetorial, a mudança na direção também é considerada uma aceleração. Já o acelerômetro é um dispositivo que mede o efeito das forças externas agindo sobre o mesmo, como comentam Janani e Sabu (2016).

Portanto, com o conjunto de acelerômetro e GPS presentes nos *smartphones*, é possível registrar as variações de aceleração causadas pela irregularidade de pavimentos, assim como a velocidade e coordenadas nos dados coletados. A análise deste defeito por este método é realizada de duas maneiras: 1) utilização dos valores brutos de aceleração, e 2) transformação destes dados em deslocamentos após o tratamento dos sinais. Para o cálculo do IRI se utilizam os deslocamentos (BISCONSINI, 2016).

Ainda de acordo com Bisconsini (2016), de maneira semelhante aos medidores do tipo resposta, as acelerações registradas pelos acelerômetros apresentam grande sensibilidade à velocidade de passeio do veículo e, devido a isto, precisam de calibração, objetivando determinar, para cada velocidade operacional, a relação entre o índice de irregularidade de referência (obtido por meio do método de Nível e Mira, neste trabalho) e o número de deslocamentos verticais pela distância percorrida, medidos pelo aparelho móvel. Logo, conclui-se que o perfil produzido pelos medidores tipo resposta não é o real, e sim uma 'percepção', considerando-se que a resposta é variável de acordo com os efeitos dinâmicos decorrentes da movimentação da suspensão do veículo, que age como um filtro devido à sua configuração física.

Conforme Haas *et al.* (1994), pelo modo como são trabalhados os dados em um SGP a nível de rede, não há necessidade de uma metodologia que gere informações de alta precisão, visto que são aplicados para análises globais da

rede viária. Portanto, a produtividade e o baixo custo de implementação dos medidores do tipo resposta se mostram adequados para este fim.

Contudo, para a manutenção de um Banco de Dados eficiente, estes levantamentos com alta repetitividade não são suficientes, visto que grande parte das agências administrativas se prende a apenas cumprir a determinação das normas, em relação à frequência de coleta de dados e limites máximos que o índice de irregularidade pode atingir em determinados casos, ao invés de se fundamentar nas previsões de desempenho pavimento (BISCONSINI, 2016).

O adequado seria um SGP baseado em um Banco de Dados atualizado continuamente, para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de atividades de manutenção e reabilitação. Quanto maior o intervalo entre os levantamentos da condição dos trechos de uma rede, mais se mostra difícil a identificação dos problemas na superfície do pavimento, que evoluem constantemente pela presença da irregularidade longitudinal (BISCONSINI, 2016).

De forma geral, os trabalhos que realizaram experimentos com *smartphones* obtiveram bons resultados, apresentando correlações positivas com os índices de irregularidade registrados por outros equipamentos, como os perfilômetros inerciais (FORSLÖF, 2013) e os do tipo VIMS – *Vehicular Intelligent Monitoring Systems* (Sistemas de Monitoramento Veiculares Inteligentes) (DOUANGPHACHANH e ONEYAMA, 2013), com valores de coeficientes de determinação de aproximadamente 0,7 em determinados casos.

Foram realizados experimentos em alguns países, como por exemplo, no Equador, Jiménez e Matout (2014) realizaram testes com acelerômetros de tablets, em aproximadamente 300 km de estradas, de variados tipos, como lama, cascalho e rodovias pavimentadas, em diversas velocidades e veículos diferentes. Os resultados destes experimentos confirmaram a variação de aceleração é capaz de produzir dados úteis para indicar a condição da superfície, e também a influência da suspensão do automóvel, visto que usaram diferentes modelos e tamanhos. Já Schlotjes *et al.* (2014) estudaram a utilização do *Roadroid*, um aplicativo da plataforma *android*, para a coleta de dados em países remotos, como as nações das ilhas do pacífico, onde existem dificuldades,

logísticas e econômicas, de se acessar as informações da situação de suas malhas rodoviárias.

Conforme reforçam Douangphachanh e Oneyama (2013), e também Jiménez e Matout (2014), os baixos custos e simplicidade do emprego de smartphones para a avaliação da irregularidade longitudinal da malha rodoviária de países em desenvolvimento, onde raramente se encontra perfilômetros a laser, se mostra de alta relevância, devido a situações comuns nestas regiões, como infraestrutura e orçamento limitados. Como a maioria dos equipamentos de medição de alta tecnologia apresentam alto custo, grande parte dos órgãos rodoviários realizam a coleta destes dados com baixa frequência, resultando em bancos de dados desatualizados e prejudicando, assim, a tomada de decisões administrativas por parte das agências.

Também é possível citar a constante evolução da tecnologia empregada nos smartphones, já que sua popularização entre o público cresce rapidamente. De acordo com dados levantados e analisados, em 2016, pela *Visual Networking Index (VNI) Global Mobile Data Traffic Forecast*, no ano de 2020, aproximadamente 70% da população irá possuir um dispositivo deste tipo. Ainda de acordo com Douangphachanh e Oneyama (2013), este crescente número de usuários representa um potencial expressivo no levantamento de dados em grande quantidade e com baixos custos de implementação, se aplicados em um sistema colaborativo. Além dos baixos impactos econômicos, este sistema apresenta capacidade de monitoramento de variados tipos de defeitos em toda a rede rodoviária, e não somente da irregularidade longitudinal.

Não somente as agências administrativas, como também os usuários das rodovias poderiam se beneficiar de um sistema colaborativo de coleta de informações sobre as condições das estradas. Como apontam Geem *et al.*, (2016), no experimento realizado para corroborar com os resultados do SENSOVO – *Sensors on Vehicles*, ou sensores em veículos, no qual foi utilizada informações relevantes uma frota de automóveis para realizar automaticamente este levantamento. Este projeto objetivava investigar o potencial de detecção de irregularidades na superfície do pavimento por meio de informações coletadas por essa frota. Foram considerados dois cenários diferentes, o primeiro consistia de automóveis e caminhões comuns, que transmitiam informações relevantes

coletadas pelo *CAN-bus* (*Controller Area Network*, sistema de transferência de dados entre diferentes microcontroladores e outros dispositivos eletrônicos) presente nos veículos, e o segundo cenário de um automóvel equipado com câmeras ToF – *Time-of-Flight*, um sistema de câmeras de grande alcance.

A obtenção dos dados por meio do *CAN-bus* instalado em carros e caminhões modernos se mostrou de grande precisão, e o sistema ToF pode ser considerado como uma ferramenta promissora, que pode ser montado em uma pequena frota de veículos. Considerando-se que estas ferramentas possuem um custo relativamente baixo, o sistema SENSOVO tem grande potencial de ser usado por administradores de rodovias, podendo ser utilizado para dar uma nota para os segmentos de estradas, indicando a qualidade da superfície do pavimento. Quando tratada estatisticamente durante um longo período de tempo, estes dados podem ser indicativos para uma gerência em nível de rede (Geem *et al.*, 2014).

Por outro lado, é preciso considerar que um sistema alimentado pelo público apresentaria algumas desvantagens, como comentam Sauerewin e Smith (2011), mesmo que a implementação técnica da coleta de dados de irregularidade por meio de smartphones seja possível. Alguns destes pontos negativos levantados pelos autores incluem: necessidades de modificações nos veículos, que podem ser caros e influenciam na coleta de dados, geram grandes quantidades de dados (devido à alta taxa de aquisição dos acelerômetros) e necessitam de outros sistemas para realizar a filtragem das amostras, e estas ainda precisam de mais estudos para confirmarem a sua aplicação, cobertura de coleta inconsistente e falta de incentivo para os proprietários dos veículos privados em relação à utilização destes aplicativos. Mesmo que ainda não tenham alcançado uma forma eficaz de implementar este sistema, os autores comentam esta possibilidade conta com uma grande margem de crescimento em um mercado cada vez maior, além de baixo custo para colaboradores deste processo.

Em resumo, a tecnologia está sempre evoluindo, e cada vez mais possibilita novos meios e possibilidades mais práticas nas áreas de pesquisa. E com a implementação de sistemas baseados em *smartphones* na infraestrutura de transportes não é diferente. De acordo com o Manual de Gerência de

Pavimentos do DNIT (2011), a busca por novas ferramentas, aplicáveis em nível de rede, mostra-se fundamental para manter um SGP atualizado e eficiente, considerando-se que, neste caso as informações essenciais devem ser simples e possuir uma coleta de dados mais frequente.

2.10 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Como mencionado no item anterior, a irregularidade longitudinal dos pavimentos causa acelerações verticais na carroceria dos automóveis em tráfego. Tais variações dependem da condição da superfície da rodovia, que pode ser afetada pela existência e extensão de defeitos e irregularidades, assim como também das características do sistema de suspensão do veículo e da velocidade operacional. Estes valores podem ser obtidos pelo acelerômetro presente no *smartphone*, quando este é fixado de alguma forma no interior do veículo.

Esta possibilidade se deu devido à evolução da tecnologia e diminuição nos sensores de movimento, mais especificamente com a criação dos *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS), ou sistemas micro-eleto-mecânicos, em português. A criação dos MEMS viabilizou equipamentos cada vez mais portáteis para os usuários, como é o caso dos *smartphones*, dispositivos que possuem componentes eletrônicos como acelerômetros triaxiais, giroscópios triaxiais, magnetômetros e barômetros (DEL ROSARIO *et al.*, 2015).

Conforme Silva *et al.* (2015) os acelerômetros micro-eleto-mecânicos são aplicados em diversos itens do uso cotidiano da população, como sistemas de *airbags*, *smartphones* e consoles de *vídeo games*. E também são utilizados nos setores de defesa e de espaço, onde são empregados em sistemas de guiagem inerciais de artefatos, entre outras aplicações relevantes.

De acordo com Figueiredo *et al.* (2007), os acelerômetros são divididos em três categorias: a) acelerômetros capacitivos, b) acelerômetros piezoelétricos e, c) acelerômetros piezoresistivos. E são tipicamente constituídos por uma massa de reação suspensa por uma estrutura estacionária.

Os capacitivos (Figura 28) são dispositivos que possuem um condensador entre a massa e a estrutura de suporte, e apresentam sensibilidade

à mudança de capacitância entre eles. A aceleração da massa altera o espaço entre a placa fixa e a móvel do capacitor, o qual é inversamente proporcional à carga do mesmo. Em resposta à aceleração, a capacitância elétrica varia, o que gera alterações no sinal de saída do circuito. São destes os instalados nos smartphones, que se caracterizam pela não linearidade e por não apresentarem sensibilidade à temperatura (BEEBY *et al.*, 2004).

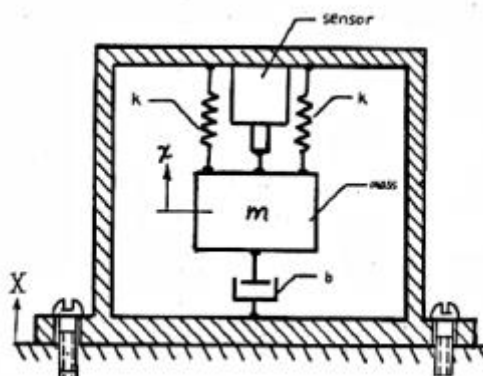


Figura 28 – Esquema de um acelerômetro capacitivo.
Fonte: Figueiredo *et al.*, 2007.

Os piezoelétricos são constituídos de cristais sintéticos ou naturais, que produzem carga quando são comprimidos ou fletidos. Nestes acelerômetros a massa é unida a este cristal. Quando o corpo do dispositivo é sujeito à vibração, o cristal sofre esforços de tração ou compressão, gerando cargas. Estas forças são, de acordo com a primeira lei de Newton, proporcionais à aceleração.

Em comparação aos acelerômetros piezoelétricos, os piezoresistivos substituem o cristal piezoelétrico por um componente piezoresistivo. A força exercida pela massa faz variar a resistência. Na Figura 29 é ilustrada a configuração interna de um destes sistemas, constituído de um *chip* composto de vários pares de eletrodos e uma massa sísmica (Figura 30). As distâncias d_1 e d_2 representam os espaços que variam conforme a aceleração aplicada ao dispositivo, compondo um par de capacitores diferenciais. A leitura do *chip* é realizada de acordo com os valores destes pares de capacitores. Como cada configuração de modelo é diferente, essas pequenas lacunas entre as partes desta estrutura eletromecânica é o que causa variações sutis entre *chips* instalados em diferentes aparelhos.

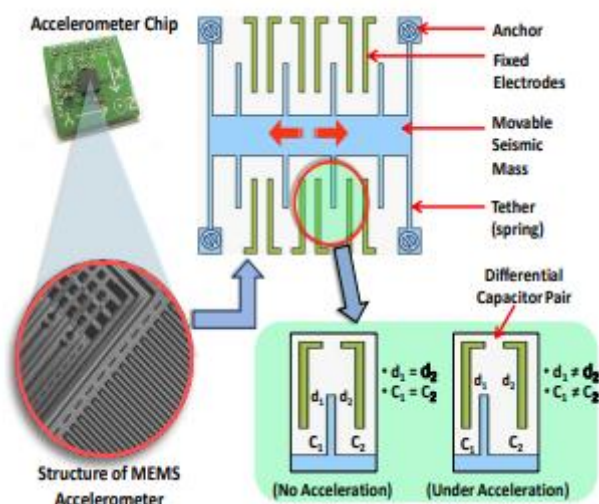


Figura 29 – Estrutura interna de um acelerador MEMS instalado em um smartphone
 Fonte: Dey *et al.*, 2014.

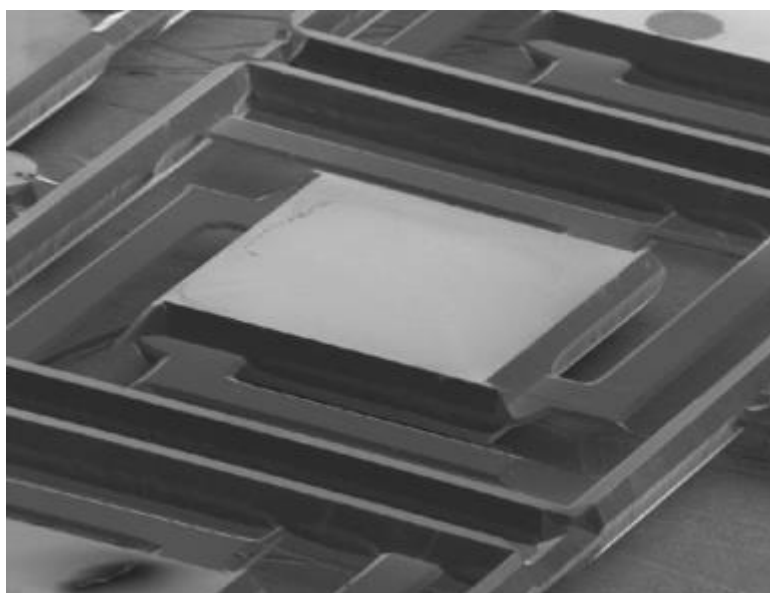


Figura 30 – Imagem da massa sísmica, fabricada no Laboratório de Sistemas Integráveis LSI – EPUSP (Projeto ACELERAD)
 Fonte: Silva *et al.*, 2015.

Para os acelerômetros alojados em *smartphones*, os eixos são definidos de acordo com a posição da tela, por motivos de utilização, e não se modificam conforme a orientação do aparelho, registrada pelo giroscópio. Como pode ser visualizado na Figura 31, o eixo Y se localiza na direção vertical do *smartphone*, o eixo X na lateral, e o eixo Z direcionado para o exterior da face frontal do aparelho.

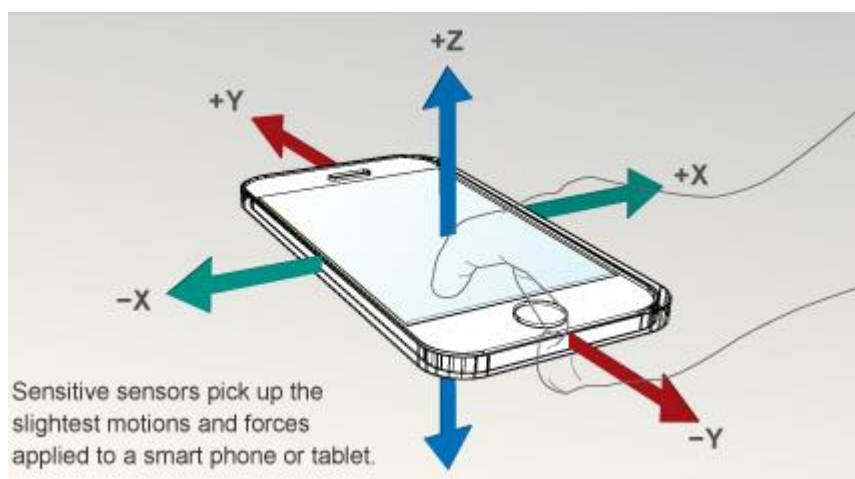


Figura 31 – Coordenadas dos sensores de um smartphone

Existem diversos aplicativos que realizam o registro das acelerações dos MEMS, como é o caso do *AndroSensor*, um dos *softwares* utilizados na literatura desta revisão. Para os levantamentos de campo realizados nesta pesquisa, utilizou-se do aplicativo UTFPR-PB-USP (Figura 32), por ser capaz de coletar coordenadas (latitude e longitude) e acelerações, simultaneamente, assim como possibilitar a escolha da taxa de aquisição de dados.

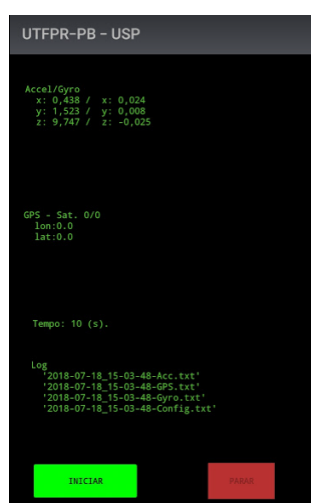


Figura 32 – Interface de registro dos dados pelo aplicativo UTFPR-PB-USP
Fonte: Própria, 2018

É preciso considerar que somente a escolha do aplicativo e *smartphone* adequados não é o suficiente. Ainda há a necessidade da fixação do dispositivo. De acordo com Belzowski e Ekstrom (2015), o aparelho apresenta certa sensibilidade ao seu arranjo de fixação, mais especificamente no sentido de que o telefone pode estar sujeito à uma “flutuação” caso o seu suporte não esteja

rigidamente fixado no painel ou no para-brisa do automóvel. Quando o *smartphone* é segurado pelo suporte de plástico, o mesmo irá perder a confiabilidade no registro das acelerações do corpo do veículo, devido à falta de rigidez do material. Além disso, quando disposto em balanço, vibrações ressonantes podem surgir devido à essa configuração, e com isso mais erros são gerados na leitura das acelerações.

Outra importante questão a ser ressaltada é a necessidade de uma área aberta para o GPS captar sinais mais preciso dos satélites, ou até mesmo um maior número destes. Devido a isto, a presença de vegetação nas faixas de domínio das estradas, pode prejudicar ou até impossibilitar os levantamentos de campo.

Já de posse dos dados de aceleração e localização, obtidos pelo acelerômetro e GPS, respectivamente, os sinais podem ser tratados e então relacionados com o índice de irregularidade de referência, obtidos através de um método estático, como o Nível e Mira. Desta forma, os valores de aceleração podem ser utilizados no cálculo da Raiz da Média Quadrática, ou RMS (*Root Mean Square*), e após isso, são convertidos em deslocamentos verticais, por meio de um tratamento específico, citado mais a frente, para o cálculo do índice de irregularidade, como nas pesquisas sobre o uso de smartphones.

Para o cálculo dos valores de RMS é utilizada a seguinte equação:

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

Na qual:

RMS: Raiz da Média Quadrática (m/s²);

az: Aceleração vertical (m/s²);

n: Número total de dados.

Um bom exemplo desta aplicação é a pesquisa realizada por Zeng *et al.* (2014), na qual os valores de aceleração vertical, adquiridos por um conjunto de dois *tablets* dispostos no assoalho do veículo, foram convertidos em RMS e confrontados com os dados de IRI registrados por um ARAN – *Automatic Road*

Analyzer (Figura 33), um analisador com a capacidade de medir outros defeitos, com o auxílio de câmeras.



Figura 33 – ARAN – *Automatic Road Analyser* (Analisador automático de rodovias)
Fonte: Higgins, 2011.

Mais recentemente, Bridgelall *et al.* (2016) realizaram testes com *smartphones* utilizando um aplicativo de monitoramento de rodovias PAVVET para repetir os dados do experimento realizado por Bridgelall (estes com sensores a nível de indústria, capazes de produzir dados de alta precisão, de localização e aceleração) de uma forma menos custosa. Para este caso, os autores calibraram o equipamento com medidores inerciais para coletar dados de IRI e concluíram que a margem de erro dos resultados chega a 5% e 2%, após 30 e 80 travessias do trecho com o veículo (um *sedan* de passeio), respectivamente.

Como os dados de IRI são dados em deslocamento por distância percorrida, é necessário realizar um tratamento matemático das acelerações obtidas pelo *smartphone*. Uma das formas de se chegar a este resultado, explicado por Moraes *et al.* (2014) é por meio da integral trapezoidal, ou mais precisamente, após duas vezes este processo. Com a primeira integração se obtém os valores de velocidade ao longo do tempo, e com a segunda chega-se aos números de deslocamento linear do corpo. A integral trapezoidal é composta de quatro etapas fundamentais, que são: 1) a decomposição do domínio em

pedaços ao longo do tempo, 2) a integração de cada parte, 3) a soma dos resultados numéricos e, 4) o cálculo da média desta soma.

Porém, o cálculo direto da integral dupla pode levar a erros, se realizada sem tratamento adequado, visto que as condições de velocidade e posição iniciais são desconhecidas. Como comentado por Sayers e Karamihas (1998), os sinais de saída de acelerômetros deveriam ser aceitáveis independentemente do valor da velocidade operacional do veículo. Porém, devido as disposições internas dos aparelhos, assim como vibrações causadas pelo motor dos automóveis, entre outros, são gerados ruídos que se misturam à leitura das acelerações causadas pela irregularidade do pavimento. Portanto, só podem ser considerados caso o sinal de saída do acelerômetro seja significativamente maior que os ruídos.

Devido a isso, os sinais de aceleração são filtrados e processados para o cálculo de índices. A filtragem feita pela Transformada Rápida de Fourier – FFT (*Fast Fourier Transformation*) é um dos métodos indicados para analisar sinais de frequência. Recentemente, Hanson *et al.* (2014) trabalharam com o *software* DATS *Toolbox* da empresa *Prosig* e empregaram este filtro para fazer o processamento justamente dos valores de aceleração captados por acelerômetros em smartphones no cálculo de dos deslocamentos verticais, para obtenção do IRI. Porém, não comentam detalhes do tratamento.

Em síntese, no processo de correlação dos sinais obtidos pelo *smartphone* é preciso dois passos principais. Primeiramente, calcula-se o RMS dos dados de aceleração e, posteriormente, realiza-se dupla integral (para obter os valores de deslocamento vertical) junto a filtragem dos dados. Por fim, correlacionam-se estes deslocamentos com os valores de irregularidade longitudinal de referência, obtidos por medidores estáticos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 OBTENÇÃO DOS ÍNDICES DE IRREGULARIDADE DE REFERÊNCIA

Para avaliar o potencial dos smartphones na estimativa da irregularidade longitudinal de pavimentos, foram realizados levantamentos topográficos através do método de Nível e Mira (Figura 34), padronizados pela norma DNER-ES 173/86, para calcular índices de referência e compará-los aos valores de RMS calculados a partir dos dados de aceleração obtidos pelos smartphones utilizados nesta pesquisa.



Figura 34 – Nível a Laser
Fonte: Própria, 2018.

Com o intuito de auxiliar os levantamentos, foi confeccionado um gabarito com 15 metros demarcados a cada 50 centímetros, com a utilização de palanques, correntes, ganchos e mosquetões (Figura 35).



Figura 35 – Levantamento topográfico com auxílio do gabarito confeccionado
Fonte: Própria, 2018.

Inicialmente, foram procurados trechos com 500 metros de comprimento, retilíneos e com pouca declividade, de modo a diminuir a influência dessas características nos resultados. Porém, devido à dificuldade em encontrar estradas em situações e com prolongamentos que correspondessem a estas necessidades, apenas dois segmentos com estas características foram selecionados. Para as demais coletas foram selecionados trechos com 100 e 200 metros de comprimento, totalizando uma extensão de 1500 metros de amostragem.

Para os levantamentos realizados, foram escolhidos trechos com níveis distintos de irregularidade: de baixa irregularidade (IRI com cerca de 2 m/km), com condição intermediária e de maior irregularidade (IRI acima de 4 m/km). Desta forma, foi possível cobrir uma faixa suficiente de dados, que serviram de base para a avaliação da consistência dos resultados alcançados com o uso dos *smartphones*. Os índices foram calculados para subtrechos de 100 metros de comprimento. Existem dois motivos para esta divisão:

1. Em SGPs, considera-se adequada a separação das vias em subtrechos de 100 metros ou mais, para ser realizada a avaliação da condição da superfície dos pavimentos;
2. A redução do comprimento destes subtrechos poderia aumentar incidência de erros durante a comparação dos resultados obtidos pelo acelerômetro com os valores medidos pelo levantamento topográfico, feito pelo método de Nível e Mira.

Para se definir os trechos, foram selecionadas estradas na cidade de Pato Branco – PR, nas quais foram realizados testes com uso de veículos e alguns modelos de *smartphones*. Já para definir quais seriam os utilizados na pesquisa, foram analisados os trechos que pudessem atender as seguintes exigências:

1. Prolongamento do trecho suficiente para acelerar e desacelerar o automóvel com segurança até as velocidades de 40 e 60 km/h;

2. A sensação dos ocupantes do automóvel em relação às vibrações do mesmo;
3. A captura de número suficiente de satélites (no mínimo 4) pelos GPS do *smartphone*, que define a precisão das coordenadas obtidas.

Com este pensamento, foram escolhidos cinco trechos para esta pesquisa, cada um com um nível diferente de irregularidade, a fim de comparar os resultados obtidos entre as amostras.

3.1.1 Trecho 1 – Empresa Sementes Guerra

O primeiro trecho definido e onde foram realizados testes iniciais e levantamentos foi o segmento da estrada particular da empresa Sementes Guerra, localizada na cidade de Pato Branco (em vermelho na Figura 36). O trecho recebe fluxo de máquinas e veículos (como pode ser observado na Figura 37) e apresentava uma condição de pavimento visualmente boa em relação a outros trechos encontrados, tanto pela aparência quanto pelos testes preliminares realizados com a passagem do veículo pela via.



Figura 36 – Vista aérea da empresa Sementes Guerra
Fonte: Google Earth, 2018.

A Figura 36 mostra uma vista aérea da empresa Sementes Guerra, capturada através do *software Google Earth*, com a linha vermelha indicando o

segmento utilizado para o levantamento. Como pode ser visualizado na Figura 37, mesmo durante o levantamento topográfico, era comum o tráfego de veículos no trecho analisado.



Figura 37 – Tráfego de caminhões no trecho analisado
Fonte: Própria, 2018.



Figura 38 – Levantamento topográfico na empresa Sementes Guerra.
Fonte: Própria, 2018.

3.1.2 Trecho 2 – Rua Irineu Parzianello

Para a condição de maior irregularidade foi escolhida uma das faixas da rua Irineu Parzianello, indicado em vermelho na Figura 39, também situado na cidade de Pato Branco, nas proximidades da UTFPR. O pavimento desta via estava em péssimas condições, devido ao tráfego constante de ônibus de transporte público e privado, assim como caminhões, principalmente na faixa sentido bairro, porém, devido ao constante fluxo destes veículos, optou-se por realizar o levantamento na outra faixa do trecho, que também apresentava defeitos, mas em menor escala.



Figura 39 – Vista aérea da rua Irineu Parzianello
Fonte: Google Earth, 2018.

Durante a coleta (Figura 40) foram notados diversos defeitos no pavimento, como pode ser observado nas Figuras 41 e 42.



Figura 40 – Levantamento topográfico na rua Irineu Parzianello
Fonte: Própria, 2018.



Figura 41 – Condição da rua Irineu Parzianello
Fonte: Própria, 2018.



Figura 42 – Defeitos na rua Irineu Parzianello
Fonte: Própria, 2018.

3.1.3 Trecho 3 – Rua Benjamin Borges dos Santos

O terceiro trecho escolhido foi um segmento da rua Benjamin Borges dos Santos, no bairro Fraron, indicado na cor vermelha na Figura 43. A via que recebe tráfego de veículos de passeio, em sua maioria, apresentava uma condição superficial visualmente boa, sendo escolhida por estar situada em um local com pouco movimento de automóveis, o que facilitou a coleta de dados com o Nível e Mira (Figura 44) e também com o veículo.



Figura 43 – Vista aérea da rua Benjamin Borges dos Santos
Fonte: Google Earth, 2018.



Figura 44 – Levantamento topográfico com Nível e Mira na rua Benjamim Borges dos Santos
Fonte: Própria, 2018.

3.1.4 Trecho 4 – Bairro Dona Matilde

Para a condição de baixa irregularidade, foi utilizada uma das faixas de uma rua, ainda sem nome na época desta pesquisa, no bairro Dona Matilde (Figura 45). Como está localizado entre loteamentos novos, este trecho praticamente não recebe tráfego de veículos, e apresentava uma aparência superficial muito boa, como pode ser observado na Figura 46.



Figura 45 – Vista aérea do trecho de coleta no bairro Dona Matilde
Fonte: Google Earth, 2018.



Figura 46 – Levantamento topográfico com Nível e Mira no Bairro Dona Matilde
Fonte: Própria, 2018.

3.1.5 Trecho 5 – Rodovia PR-493

Para completar as amostras, o último trecho analisado foi o segmento indicado em vermelho na Figura 47, da PR-493, também conhecida como Via do Conhecimento. Por ser uma rodovia estadual, com grande volume de tráfego, foi requisitado uma autorização do Departamento Estadual de Estradas de Rodagem do Paraná (DER-PR), assim como do Departamento de Trânsito de

Pato Branco-PR (DEPATRAN), para que fosse possível realizar as coletas de dados em segurança (Figura 48).



Figura 47 – Vista aérea da rodovia PR-493
Fonte: Google Earth, 2018.



Figura 48 – Levantamento topográfico na rodovia PR-493 com auxílio do DEPATRAN
Fonte: Própria, 2018.

Este trecho foi escolhido por apresentar, como já mencionado, um grande volume de tráfegos. Desta forma, o pavimento do local apresenta maior irregularidade em alguns pontos, em consequência do alto volume de veículos

no local, assim como diversas intervenções de remendos em sua superfície, como pode ser observado nas Figuras 49 e 50.



Figura 49 – Situação superficial da rodovia PR-493
Fonte: Própria, 2018.



Figura 50 – Afundamentos nas trilhas de roda
Fonte: Própria, 2018.

Os dados coletados pelo método de Nível e Mira foram utilizados para analisar a irregularidade longitudinal dos pavimentos nos trechos desta pesquisa, por meio do cálculo do IRI, pelo software ProVAL (*Profile Viewing and Analysis*). Para que isto seja possível, o programa necessita dos dados

acumulados das cotas medidas, intervalos de amostragem de 50 centímetros, e respectivas unidades de medida. Para definir o índice de irregularidade da pista é feita a média entre os valores de IRI calculados nas duas trilhas de rodas em cada segmento de 100 metros avaliados.

3.2 LEVANTAMENTO DA IRREGULARIDADE A PARTIR DE UM SMARTPHONE

3.2.1 Escolha Do Modelo De Smartphone

Para esta pesquisa, optou-se pela escolha dos modelos *Samsung Galaxy S7 Edge*, *Motorola Moto Z2* e *Motorola Moto G4 Plus*, para as coletas de campo. A escolha se deu por estes serem os *smartphones* pessoais da equipe que participou dos levantamentos de campo e por permitirem maiores taxas de aquisição de acelerações. No caso do *smartphone Samsung Galaxy S7 Edge*, a aquisição de acelerações medidas pelo aplicativo UTFPR-PB-USP, as taxas chegaram a 500 Hz. Essa taxa de aquisição de dados depende da capacidade de processamento do dispositivo.

Para saber se o acelerômetro do *smartphone* está funcionando de forma adequada, basta observar se o aplicativo registra a aceleração com valores próximos a $9,81 \text{ m/s}^2$ para o eixo normal à tela, e 0 m/s^2 para os demais, quando em repouso e posicionado perpendicularmente a uma superfície plana. Isto indica que os eixos do acelerômetro não estão deslocados. Alguns aplicativos fazem uso de um filtro passa-alta para eliminar a influência da gravidade, para estes casos, quando em repouso o aplicativo deve registrar valores próximos a 0 m/s^2 para todos os eixos, visto que o próprio funcionamento do aparelho gera pequenas vibrações, que são traduzidas em valores de aceleração (BISCONSINI, 2016).

3.2.2 Aplicativo Utilizado na Coleta de Dados com Smartphones

Para esta pesquisa, foi utilizado o aplicativo UTFPR-PB-USP, em parceria com o Departamento Acadêmico de Informática (DAINF) da UTFPR do

Campus Pato Branco como parte de um projeto de inovação intitulado “Avaliação da Condição de Pavimentos com *Smartphones*”, do qual este trabalho também é parte. O aplicativo registra os sinais do GPS e do acelerômetro instalados nos *smartphones* desenvolvidos em plataforma *Android*, e possibilita a obtenção das coordenadas (latitude e longitude) e acelerações, simultaneamente. A saída dos dados se dá a partir de documentos eletrônicos de texto. O aplicativo oferece a opção de se definir qual taxa de aquisição e velocidade na atualização dos dados se deseja, sendo limitado pela capacidade do *smartphone*.

No caso do *smartphone Samsung Galaxy S7 Edge*, utilizado neste estudo para a obtenção dos valores de RMS, foi possível alcançar taxas de até 500 Hz, como mencionado, porém, a taxa definida para a coleta de dados foi de 200 Hz, visto que frequências de aquisição mais altas tornariam os tratamentos difíceis, devido à grande quantidade de informações. Assim, o intervalo de amostragem dependerá da velocidade do veículo durante a coleta de dados. Por exemplo, com a velocidade de 60 km/h e uma frequência de 200 Hz, tem-se aproximadamente um valor de aceleração a cada 8,33 cm de estrada.

Os dados registrados pelo GPS, na frequência definida, são atualizados a cada segundo. Desta forma, para uma coleta mais eficiente de dados, deve-se partir de um ponto conhecido antes do início do trecho, com o veículo em repouso. Logo, é necessário aguardar ao menos um segundo após pressionada a opção de início de gravação, para que o aplicativo registre o segundo dado de latitude e longitude, para só então acelerar o veículo, até atingir a velocidade de interesse antes do ponto inicial medido pelo método de Nível e Mira, e parar a gravação no último ponto, que é o fim do trecho. Outro ponto importante é a necessidade de aguardar até que o GPS do *smartphones* colete ao menos quatro satélites, para se ter uma precisão aceitável (BISCONSINI, 2016).

Existe a possibilidade de ocorrerem algumas falhas na leitura do aplicativo, devido à precisão do GPS, assim como no instante de interromper a coleta de dados. Para diminuir estes erros, foram excluídos os dados da análise em que a velocidade operacional variou de 5 km/h, para mais ou para menos (para a velocidade de 40 km/h, por exemplo, foram eliminadas as coletas em que a velocidade ficou acima de 45 km/h ou abaixo de 35 km/h). Para a definição destes critérios, considerou-se a dificuldade na obtenção dos dados em uma

velocidade constante e a ordem de grandeza dos erros sobre os resultados obtidos.

3.2.3 Escolha do Suporte

Como é necessário que o acelerômetro faça a leitura apenas das acelerações causadas pela irregularidade da superfície, é de grande importância a escolha do suporte veicular para o dispositivo. Grande parte dos suportes permitem um movimento exagerado do aparelho, devido a flexibilidade do material, pela presença de rótulas ou pela configuração em balanço, o que pode resultar em vibrações excessivas e, conseqüentemente, perda da fidelidade na leitura dos movimentos do corpo do veículo (BISCONSINI, 2016).

O primeiro suporte utilizado nesta pesquisa, devido à sua superfície antiderrapante, é o conhecido como “tapete mágico”, ou *Anti-Slip Car Pad* (Figura 51). O material adesivo composto de gel sílica do suporte permite a fixação do *smartphone* com certa firmeza, impedido o seu deslocamento no interior do automóvel. Os primeiros testes foram realizados se fazendo uso deste tipo de suporte.



Figura 51 – Exemplo de utilização do Anti-Slip Car Pad.

Fonte: <<https://rj.olx.com.br/rio-de-janeiro-e-regiao/computadores-e-acessorios/anti-slip-car-pad-tapete-magico-antiderrapante-veicular-gel-504720221>>

Disposto em uma posição perpendicular em relação ao eixo longitudinal do veículo, o aparelho foi posicionado de forma a medir a aceleração no eixo Z do *smartphone*. Após os testes preliminares, optou-se pelo suporte do tipo articulado (Figura 52), fixado por um ventosa no para-brisa do veículo, já que este facilita o toque na tela para início e fim das gravações no aplicativo.



Figura 52 – Suporte Veicular de Smartphone
Fonte: Própria, 2018.

Para realizar os levantamentos com o *smartphone*, o mesmo foi fixado da maneira indicada acima. Como auxílio para a utilização do aplicativo, foi conectado um *mouse* por meio de um adaptador OTG – *On The Go*. Devido a isto, foi necessário posicionar o *smartphone* virado para baixo, desta forma a aceleração vertical é dada pelo eixo Y.

Apesar da utilização de diferentes *smartphones* para os testes iniciais, apenas o modelo *Samsung Galaxy S7 Edge* foi utilizado para se correlacionar com os dados obtidos pelo Nível e Mira, assim não foi analisada a variação entre resultados produzidos por diferentes modelos por meio de coletas de campo.

Estes resultados serão apresentados no projeto de inovação “Avaliação da Condição de Pavimentos com *Smartphones*”.

3.2.4 Modelo do Veículo

Utilizou-se o modelo *Fiesta Sedan*, da marca *Ford*, ano 2010/2011, motor 1.6 Flex, de 107 cavalos, de propriedade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Não foi levado em consideração a massa do sistema, ou seja, a influência do volume de combustível no taque e a quantidade de pessoas no carro não foi considerada nos cálculos, assim como a situação da suspensão do automóvel.

3.2.5 Processamento dos Dados

Os dados coletados pelo acelerômetro e GPS do *smartphone* são dados pelo aplicativo UTFPR-PB-USP em formato CSV (*Comma Separated Values*, ou valores separados por vírgula) em um documento de texto. São gravados simultaneamente os dados de latitude e longitude, aceleração nos três eixos, tempo e acelerações de rotação (giroscópio).

As coordenadas de latitude e longitude são fornecidas no formato de ângulos decimais. Com esses dados, calculou-se a distância entre os pontos coletados, aplicando-se a equação de *Haversine*, uma das fórmulas básicas da navegação, baseado na Lei dos Cossenos, que considera no modelo a curvatura da Terra, isto é, o raio da mesma (Figura 53).



$$=Raio * ACOS(COS(RADIANOS(90 - Latitude_1)) * COS(RADIANOS(90 - Latitude_2)) + SEN(RADIANOS(90 - Latitude_1)) * SEN(RADIANOS(90 - Latitude_2)) * COS(RADIANOS(Longitude_1 - Longitude_2)) * Fator_Ajuste)$$

Figura 53 – Fórmula de Haversine

Onde:

Latitude_1 = latitude do ponto 1, em coordenadas decimais;

Latitude_2 = latitude do ponto 2, em coordenadas decimais;

Longitude_1 = longitude do ponto 1, em coordenadas decimais;

Longitude_2 = longitude do ponto 2, em coordenadas decimais;

Raio = raio de curvatura do planeta Terra, aproximadamente 6371 km;

Fator_Ajuste = fator de ajuste pela diferença entre a distância linear e a distância rodoviária, tomado igual a 1 (um) devido às pequenas distâncias entre os pontos coletados.

A partir do cálculo da distância e da organização dos dados do aplicativo em planilha eletrônicas, o que inclui a eliminação dos valores com erros, passa-se para a etapa de cálculo dos valores de RMS.

3.2.6 Cálculo Dos Valores De RMS De Aceleração Com Smartphones

Como mostrado nos trabalhos de Bridgelall *et al* (2016) e Belzowski e Ekstrom (2015), a partir de um certo número de viagens conduzidas pelo veículo no mesmo trecho, os erros gerados pelo condutor em manobras no trajeto, pela resposta do veículo, assim como os de aquisição de dados pelo *smartphone* tendem a diminuir e, com isso, refinam a previsão das classificações de irregularidade dos pavimentos em termos de IRI.

Desta forma, de posse dos valores de RMS calculados para os dados obtidos pelos *smartphones Samsung Galaxy S7 Edge, Motorola Moto Z2 e Motorola Moto G4 Plus*, investigou-se a repetitividade destes valores, por meios estatísticos, como desvio padrão e coeficiente de variação, conforme o trecho analisado e a velocidade de operação. Seguindo a linha dos procedimentos para calibração de medidores tipo resposta indicados pela norma americana ASTM E 1448/92, fez-se uso da média dos valores calculados de RMS em cada segmento avaliado.

Para os fins desta pesquisa, foram realizadas dez coletas em cada trecho visitado, todas em conformidade aos critérios estabelecidos no item 3.2.2. Posteriormente, os valores de RMS de aceleração calculados para cada segmento de 100 metros foram equiparados aos valores de IRI, neste mesmo intervalo, computados com os dados obtidos nos levantamentos topográficos realizados pelo método de Nível e Mira. Esta parte do procedimento foi realizada por meio de gráficos de dispersão entre os valores supracitados. As curvas e respectivos coeficientes de correlação objetivam avaliar o comportamento dos

dados obtidos pelo *smartphone* em relação à irregularidade longitudinal dos pavimentos, assim como a variação dos valores de acordo com as velocidades de operação utilizadas neste trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO DE NÍVEL E MIRA

Para todos os subtrechos analisados, foram medidas as cotas das duas trilhas de roda (interna e externa), distanciadas a 1,40 metro uma da outra, conforme estabelece a norma DNER-ES 173/86. Devido à escala empregada, as linhas de cotas se sobrepõem, como pode ser observado nas Figuras 53 a 57. Nestas Figuras, observa-se uma inclinação de cerca de 6,0% no segmento da Sementes Guerra, 8,0% na rua Irineu Parzianello, aproximadamente 9,0% no perfil da rua Benjamim Borges dos Santos, 3,5% na seção da rua sem nome do bairro Dona Matilde, e 4,9% de acrive no trecho analisado da rodovia PR-493.

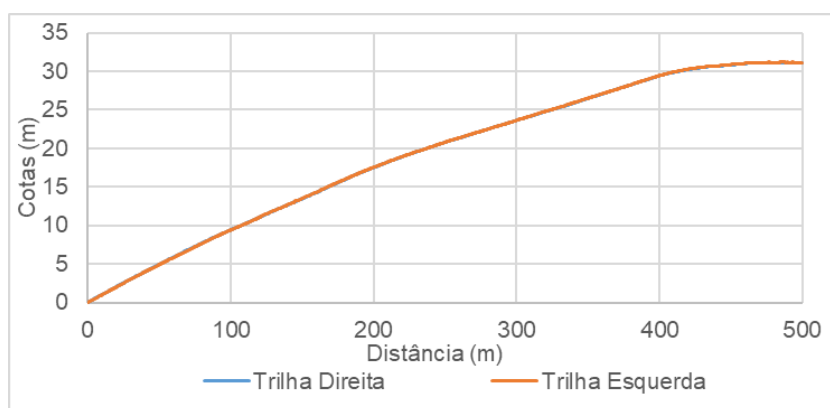


Figura 54 – Perfil da estrada da empresa Sementes Guerra.
Fonte: Própria, 2018.

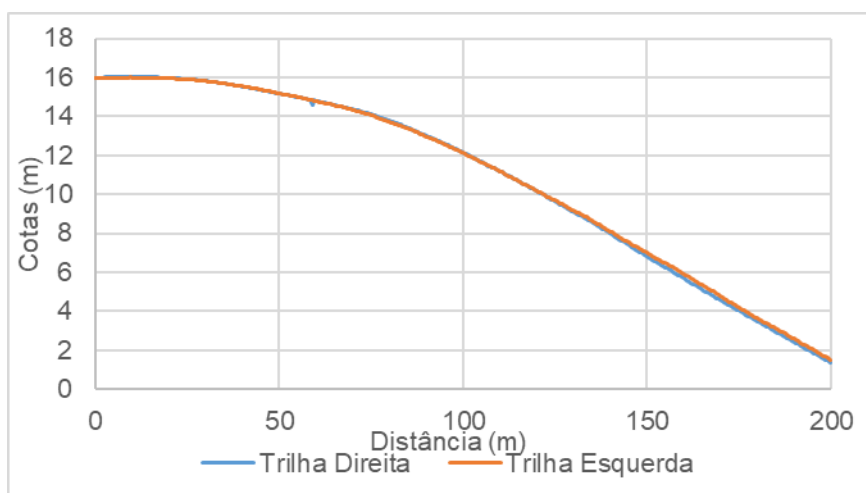


Figura 55 – Perfil da rua Irineu Parzianello.
Fonte: Própria, 2018.

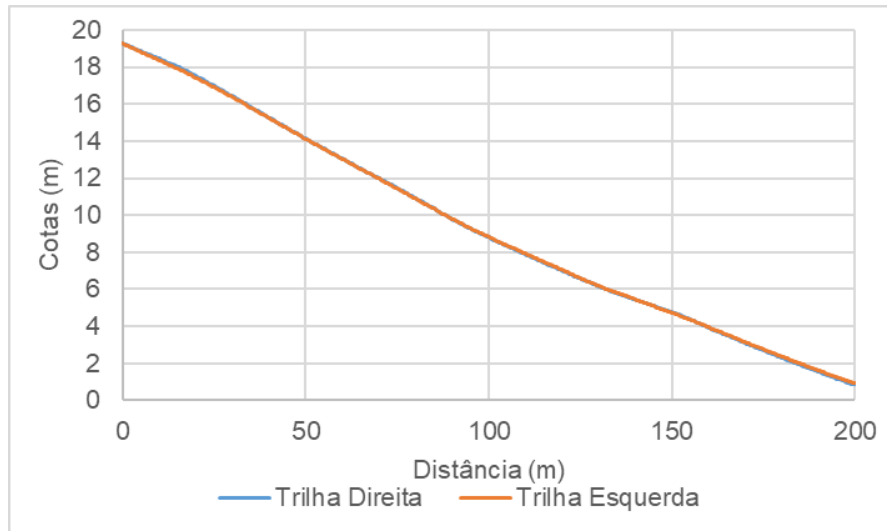


Figura 56 – Perfil da rua Benjamin Borges dos Santos.
Fonte: Própria, 2018.

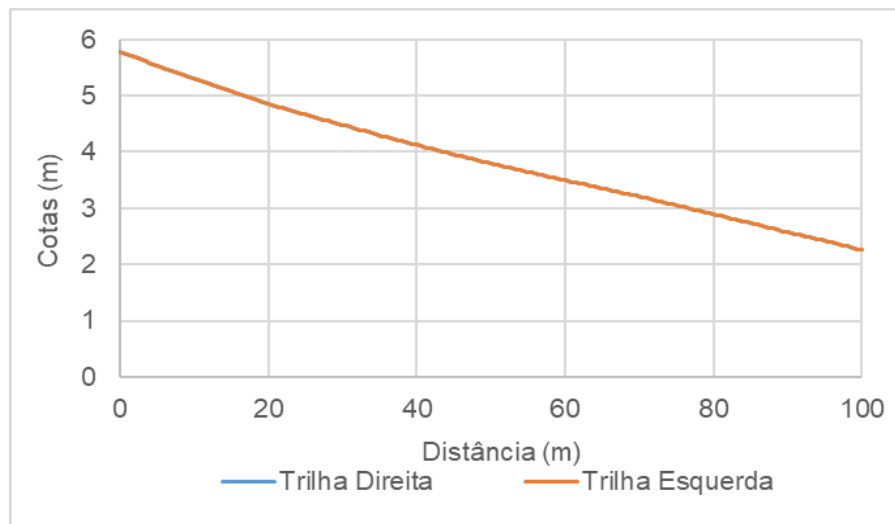


Figura 57 – Perfil do trecho do bairro Dona Matilde.
Fonte: Própria, 2018.

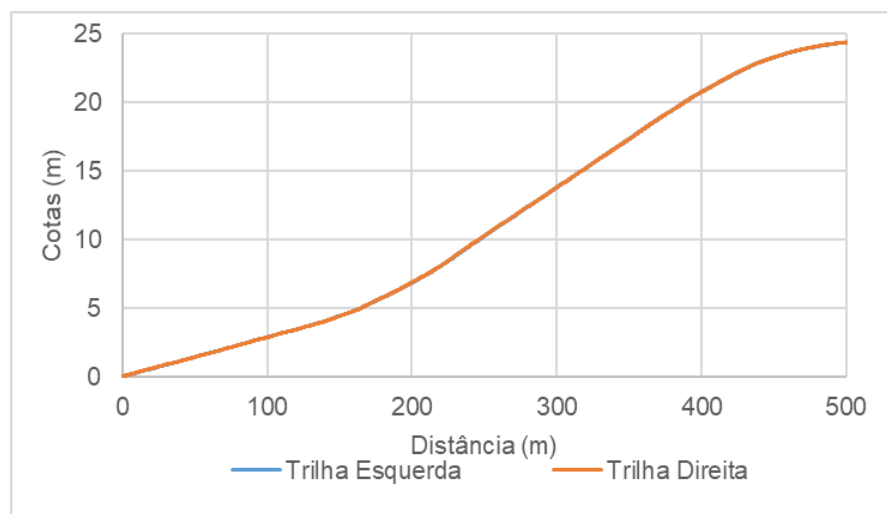


Figura 58 – Perfil da rodovia PR 493.
Fonte: Própria, 2018.

Para que fosse possível realizar a avaliação do nível de irregularidade de cada perfil, foi calculado o IRI, que trabalha como um filtro passa-faixa, no qual a resposta é gerada com um ganho menor que 0,5 para comprimentos de onda menores de 1,25 metro e maiores que 30 metros. Assim, é retirado o efeito da influência da macrotextura dos revestimentos e da inclinação das rampas observadas nos perfis. Para o cálculo do índice de irregularidade (IRI), foi utilizado o *software* gratuito ProVAL, disponibilizado pela FHWA – *Federal Highway Administration*. Os dados utilizados foram os valores das cotas acumuladas da média para cada trilha de roda e com intervalo de amostragem de 0,5 metro. Os resultados dos perfis podem ser observados na Figura 59.

Local	Trecho (m)	IRI (m/km)	Classificação	IRI Médio (m/km)	Classificação
Sementes Guerra	0-100	3,76	REGULAR	3,49	REGULAR
	100-200	4,02	MAU		
	200-300	3,78	REGULAR		
	300-400	2,76	BOM		
	400-500	3,11	REGULAR		
PR-493	0-100	4,74	MAU	5,02	MAU
	100-200	5,10	MAU		
	200-300	6,63	PÉSSIMO		
	300-400	4,48	MAU		
	400-500	4,14	MAU		
Benjamim Borges dos Santos	0-100	4,44	MAU	4,14	MAU
	100-200	3,85	REGULAR		
Irineu Parzianello	0-100	4,80	MAU	5,77	PÉSSIMO
	100-200	6,73	PÉSSIMO		
Dona Matilde	0-100	1,93	BOM	1,93	BOM

Figura 59 – Índice de Irregularidade (IRI) dos trechos levantados.
Fonte: Próprio, 2018.

A classificação dos trechos é dada de acordo com a tabela mostrada na Figura 60, conforme o Manual de Gerência de Pavimentos do DNIT (2011).

Irregularidade Superficial
IRI < 3 (BOM)
$3 \leq \text{IRI} < 4$ (REGULAR)
$4 \leq \text{IRI} < 5,5$ (MAU)
$\text{IRI} \geq 5,5$ (PÉSSIMO)

Figura 60 – Classificação quanto à irregularidade da superfície.
Fonte: Adaptado de DNIT, 2011.

Diferentemente do esperado quando foram realizados os experimentos iniciais, o trecho da empresa Sementes Guerra apresentou diferentes classificações de irregularidade, que vão desde o bom até o mau, para a superfície de seu pavimento (Figura 59), com um valor máximo de 4,02 m/km e uma média de 3,49 m/km, na extensão total de 500 metros. Tais valores podem ser uma consequência dos veículos pesados que transitam pelo local. Para se ter uma melhor visualização, a Figura 61 mostra o início do trecho analisado e a Figura 62 o seu final, na qual pode ser observadas as deformações permanentes nas trilhas de roda, no detalhe em vermelho.



Figura 61 – Início do trecho analisado na empresa Sementes Guerra.
Fonte: Própria, 2018.



Figura 62 – Final do trecho analisado na empresa Sementes Guerra, com detalhe de visualização das deformações permanentes nas trilhas de roda.
Fonte: Própria, 2018.

Como era esperado, por ser uma rodovia com tráfego constante de veículos pesados, o trecho analisado da PR-493 alcançou alto nível de irregularidade como mostrado na Figura 59, com valor máximo de 6,63 m/km e uma média de 5,02 m/km na extensão total de 500 metros. Tais valores podem ser explicados pelo nível de deformação e remendos presentes no pavimentos, como ilustra a Figura 63, em razão do já mencionado tráfego pesado e constante de caminhões e ônibus de transporte público e urbano.



Figura 63 – Pista da rodovia PR-493.
Fonte: Própria, 2018.

Da mesma forma, o segmento de 200 metros da rua Irineu Parzianello apresentou os valores mais altos de máximo e média entre os trechos avaliados, sendo de 6,73 m/km e 5,77 m/km, respectivamente. Isto pode ser traduzido como resultado de ser parte do trajeto dos ônibus de transporte público da cidade de Pato Branco, o que ocasionou uma certa quantidade de defeitos na superfície do pavimento, observados durante a coleta de campo, como pode ser verificado na Figura 64.



**Figura 64 – Pavimento da rua Irineu Parzianello.
Fonte: Própria, 2018.**

Por outro lado, o trecho de 100 metros do bairro Dona Matilde apresentou o menor valor de IRI (1,93 m/km) dentre os locais estudados. O segmento faz parte dos novos loteamentos da região (Figura 65), isto é, durante a época de elaboração desta pesquisa, o pavimento havia recebido pouco tráfego de veículos.



**Figura 65 – Pista da rua do bairro Dona Matilde
Fonte: Própria, 2018.**

Já o pavimento dos 200 metros da rua Benjamim Borges dos Santos, no bairro Fraron, mesmo com uma aparência relativamente “boa”, apresentou valores de IRI de 4,44 m/km e 4,14 m/km, de máximo e média, respectivamente. Estes níveis podem estar relacionados ao desnível entre a pista e as ruas com acesso à primeira, causando diferenças entre a trilha de roda externa e interna na forma de “degraus” súbitos.



**Figura 66 – Pista da rua Benjamim Borges dos Santos
Fonte: Própria, 2018.**

4.2 RESULTADOS OBTIDOS PELOS SMARTPHONES

Neste tópico serão analisados os resultados obtidos nos levantamentos realizados após a obtenção dos dados pelo método de Nível e Mira, na empresa Sementes Guerra, nos quais foram coletados sinais de aceleração pelos *smartphones Samsung Galaxy S7 Edge, Motorola Moto Z2 e Motorola Moto G4 Plus*, em dois automóveis diferentes, a partir do aplicativo UTFPR-PB-USP, com taxa de aquisição de 200 Hz. Além disso, como definido no item 3.1, as velocidades de operação para este trabalho foram de 40 km/h e 60 km/h, para realizar a coleta de dados com os *smartphones*.

Apesar de serem escolhidas as velocidades de 40 e 60 km/h para a realização desta pesquisa, as médias de deslocamento nas coletas foram menores que estas. Isso porque as montadoras de automóveis, quando da calibração dos velocímetros, respeitam algumas normas, como a adotada pela União Europeia, a regulamentação UN ECE *Regulation 39*, que apresenta os cálculos para a velocidade observada no mostrador. As normas indicam que nenhum velocímetro deve apresentar um valor acima da velocidade real, porém, pode fazer uma leitura 10% acima da verdadeira, acrescentada de 4 a 6 km/h, dependendo do tipo de veículo.

Portanto, mesmo que não tenham sido alcançadas as velocidades de interesse, como mostrado na Figura 67, foram tomados como referência os valores indicados na leitura do mostrador.

Trecho	Referência	Média (km/h)	Referência	Média (km/h)
Sementes Guerra		37,26		56,88
PR-493		36,29		56,97
Irineu Parzianello	40 km/h	33,50	60 km/h	55,73
Benjamim Borges dos Santos		38,13		57,88
Dona Matilde		40,91		52,18
Média		37,22		55,93

Figura 67 – Velocidades nos trechos analisados
Fonte: Própria, 2018.

Inicialmente, foram realizados testes no trecho da empresa Sementes Guerra, com os modelos Gol G2 e UP!, com os três *smartphones* definidos no item 3.2.1. Para se analisar o efeito da irregularidade em diferentes pontos, os

dispositivos foram posicionados em diferentes locais, sendo o *Galaxy S7 Edge* e o *Moto Z2* dispostos na parte superior dos consoles dos veículos e o *Moto G4 Plus* com o passageiro no banco de trás do *Volkswagen UP!*. Durante estes experimentos foram realizadas três viagens para cada velocidade mencionada anteriormente. Para exemplificar, as Figuras 68 e 69 mostram os sinais de aceleração obtidos, com a velocidade de 40 km/h e 60 km/h, respectivamente.

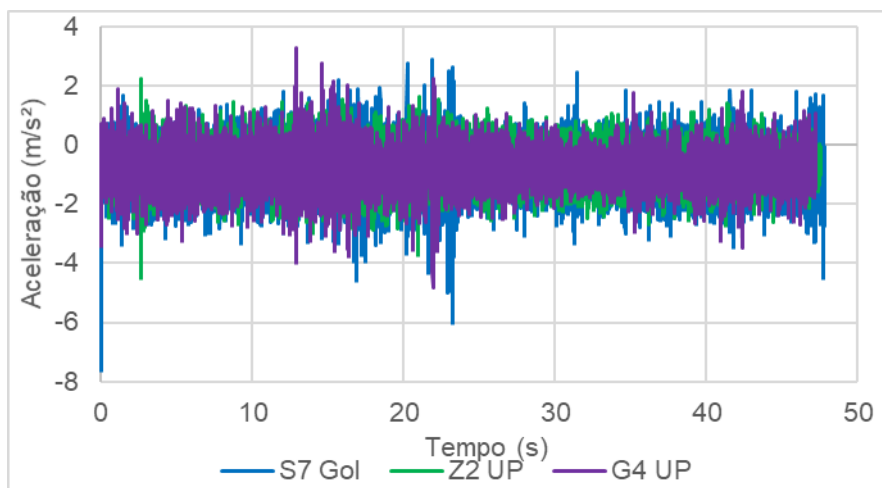


Figura 68 – Sinais de Aceleração obtidos: Sementes Guerra a 40 km/h.
Fonte: Própria, 2018.

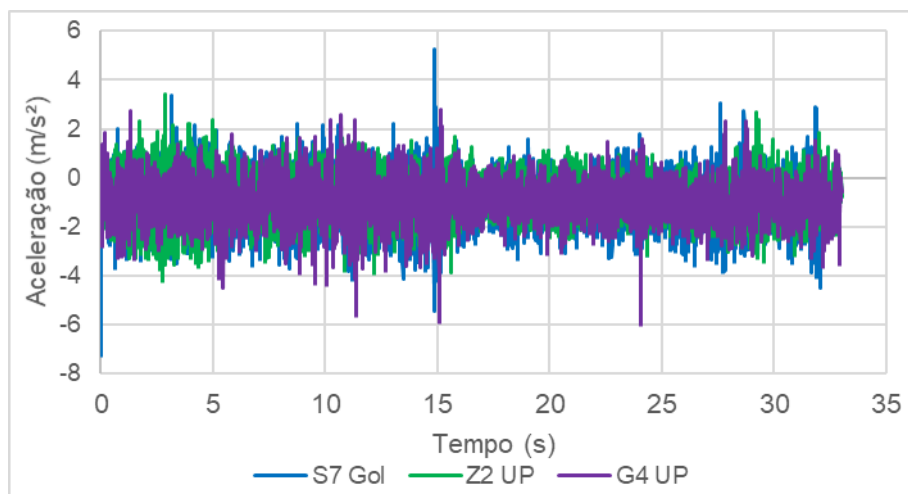


Figura 69 - Sinais de Aceleração obtidos: Sementes Guerra a 60 km/h.
Fonte: Própria, 2018.

Como pode ser observado nos gráficos das Figuras 68 e 69, as acelerações apresentam picos maiores na velocidade de 60 km/h, o que pode ser compreendido pela maior sensibilidade da suspensão do automóvel a variações na superfície do pavimento em velocidades mais altas, confirmada pela presença de amplitudes maiores no modelo *Volkswagen Gol*, por ser de

produção mais antiga que o *Volkswagen UP!*, que apresentava condições estruturais melhores.

Portanto, pode-se perceber a influência do veículo no registro dos sinais pelo *smartphone*, os quais são atenuados em automóveis com sistemas de suspensão mais novos, que suavizam a percepção das irregularidades da pista, ao passo que os mais antigos possuem maior suscetibilidade a estes defeitos da superfície. Além disso, no segundo caso também existe maior sensibilidade as vibrações do motor, o que altera a leitura dos dados pelo dispositivo móvel.

4.3 CÁLCULO DOS VALORES DE RMS DE ACELERAÇÃO VERTICAL

Este tópico irá tratar dos dados obtidos nas últimas coletas desta pesquisa, que ocorreram depois de finalizados os levantamentos topográficos, assim como os testes na empresa Sementes Guerra. Desta forma, após a medição dos perfis dos pavimentos com o Nível e Mira, foram coletados sinais de aceleração vertical pelo *smartphone Galaxy S7 Edge*, por meio do aplicativo UTFPR–PB–USP, fazendo-se uso da taxa de aquisição de 200 Hz, com o veículo modelo *Ford Fiesta Sedan*, ano 2010/2011, motor 1.6 Flex, o qual é propriedade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Devido à inclinação dos trechos, foram observadas influências nos valores de RMS obtidos pelo *smartphone*. No segmento da empresa Sementes Guerra, foi difícil alcançar e manter os 40 km/h nos primeiros 100 metros, o que gerou grande variação nos resultados obtidos. Já no bairro Dona Matilde, como grande parte da via era plana e de baixa irregularidade, os valores de RMS foram maiores para as coletas com velocidades de 40 km/h do que a 60 km/h. Neste caso, as vibrações do motor a uma velocidade menor podem ter sido preponderantes em relação às irregularidades do pavimento, enquanto na velocidade de 60 km/h, os pneus e o sistema de amortecimento podem ter atenuado os picos de aceleração medidos.

As Figuras 70 a 74 apresentam os sinais de acelerações verticais registrados pelo *smartphone* nos cinco trechos avaliados. Cada figura apresenta um exemplo de resultado obtido para cada velocidade, em uma única coleta, dentre as 10 realizadas em cada local. Nestes gráficos é possível notar como a

velocidade de 40 km/h apresenta sensibilidade nas variações da superfície, assim como as já mencionadas influências devido à inclinação na via da empresa Sementes Guerra. Outra situação adversa foi notada na rua do bairro Dona Matilde, onde, devido a parte do trecho ser bastante plana, percebeu-se mais sensibilidade do veículo as vibrações do motor na velocidade de 40 km/h, em comparação às viagens a 60 km/h, nas quais as acelerações foram menores que as do primeiro caso, diferentemente do esperado. As maiores amplitudes estão representadas no trecho da rodovia PR-493, como pôde ser notado durante as viagens realizadas, devido à quantidade de remendos no percurso. Já no bairro Dona Matilde, estão os menores valores, como já era esperado, visto que o pavimento do local é consideravelmente recente.

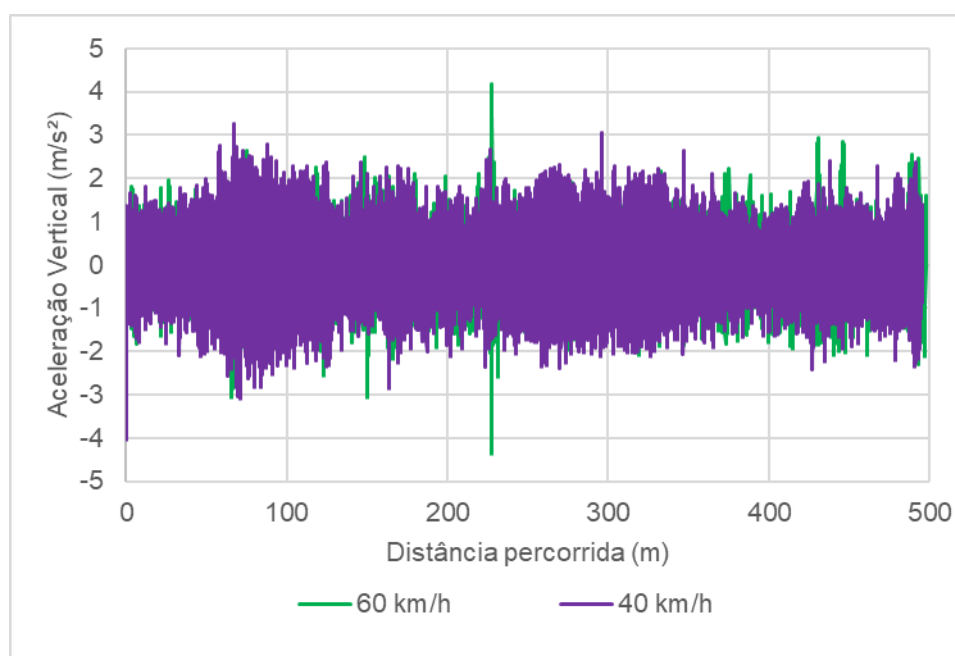


Figura 70 – Sinais de Aceleração Vertical: Sementes Guerra
Fonte: Própria, 2018.

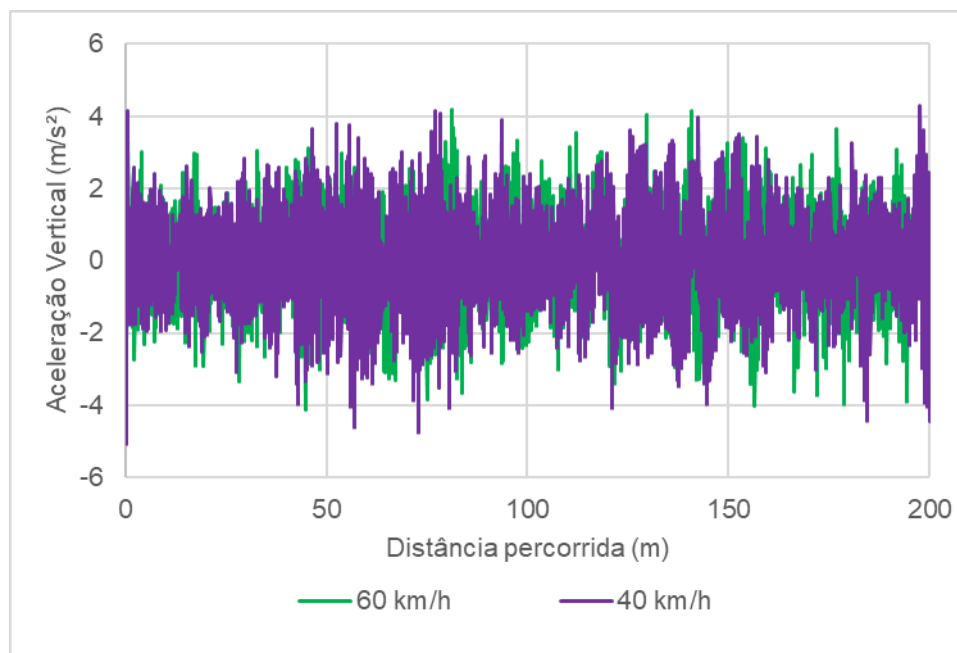


Figura 71 – Sinais de Aceleração Vertical: Irineu Parzianello
Fonte: Própria, 2018.

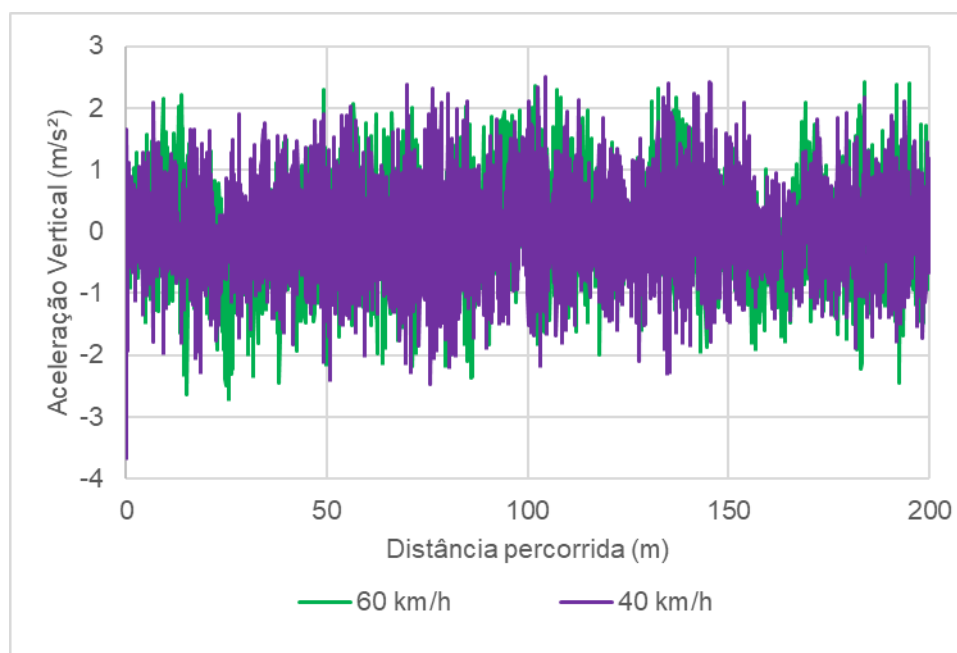


Figura 72 – Sinais de Aceleração Vertical: Benjamim Borges dos Santos
Fonte: Própria, 2018.

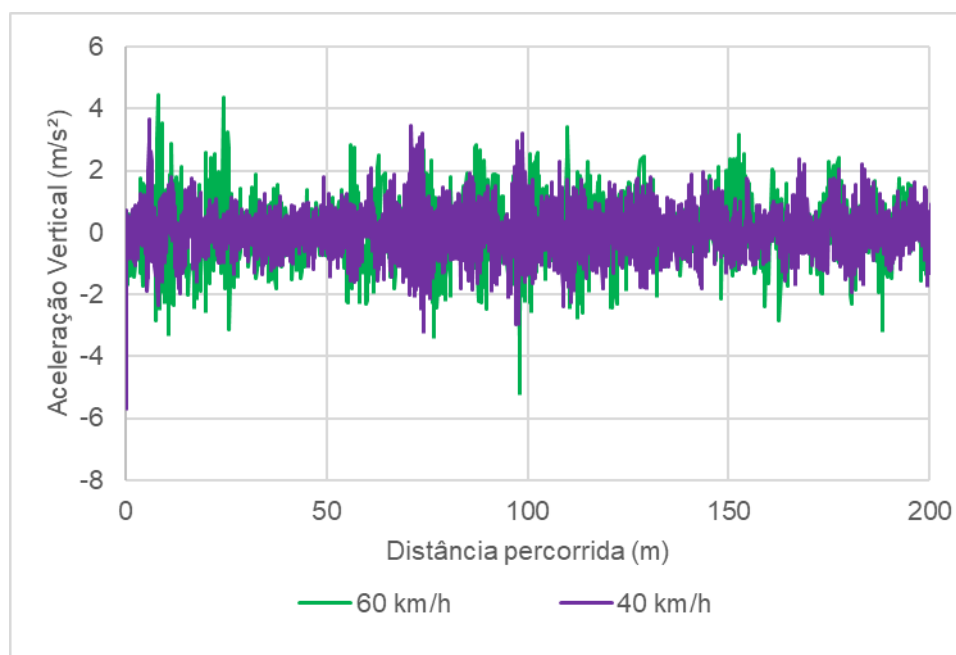


Figura 73 – Sinais de Aceleração Vertical: PR-493
Fonte: Própria, 2018.

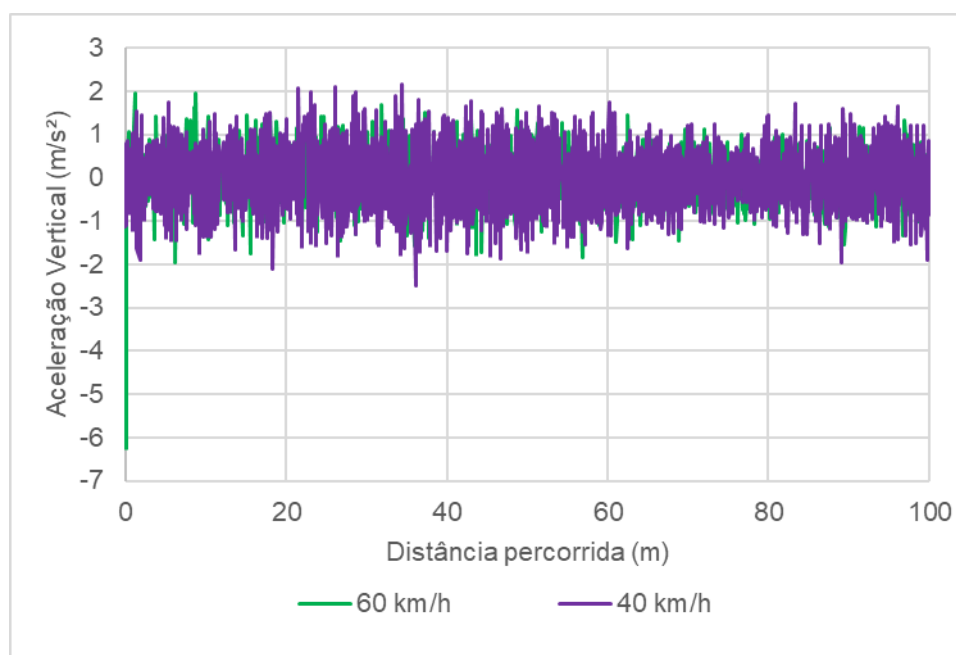


Figura 74 – Sinais de Aceleração: Dona Matilde
Fonte: Própria, 2018.

Para a análise da repetitividade dos sinais obtidos pelo *smartphone*, foram calculados valores médios de RMS de aceleração vertical para as 10 viagens realizadas, assim como o desvio padrão e o coeficiente de variação correspondente a cada local e velocidade utilizada. Os resultados dos cálculos de RMS estão nas Tabelas 4, 5, 6, 7 e 8, para a Sementes Guerra, rua Irineu

Parzianello, rua Benjamim Borges dos Santos, rodovia PR-493 e a rua do bairro Dona Matilde, respectivamente.

Tabela 3 – Avaliação da repetitividade do índice de RMS de aceleração vertical calculado a cada 100 metros para um total de 10 viagens na Empresa Sementes Guerra

Segmento (m)	Velocidade	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV (%)
0 - 100	40 km/h	0,87	0,10	11,68
100 - 200		0,89	0,09	9,70
200 - 300		0,91	0,11	11,71
300 - 400		0,87	0,13	15,34
400 - 500		0,94	0,15	15,48
Média		0,90	0,11	12,78
0 - 100	60 km/h	0,68	0,04	5,62
100 - 200		0,76	0,03	3,38
200 - 300		0,76	0,04	5,92
300 - 400		0,64	0,02	3,12
400 - 500		0,79	0,04	4,82
Média		0,73	0,03	4,57

Tabela 4 – Avaliação da repetitividade do índice de RMS de aceleração vertical calculado a cada 100 metros para um total de 10 viagens na rua Irineu Parzianello

Segmento (m)	Velocidade	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV (%)
0 - 100	40 km/h	1,21	0,10	8,31
100 - 200		1,23	0,07	5,83
Média		1,22	0,09	7,07
0 - 100	60 km/h	1,27	0,02	1,95
100 - 200		1,29	0,04	3,47
Média		1,28	0,03	2,71

Tabela 5 – Avaliação da repetitividade do índice de RMS de aceleração vertical calculado a cada 100 metros para um total de 10 viagens na rua Benjamim Borges dos Santos

Segmento (m)	Velocidade	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV (%)
0 - 100	40 km/h	0,74	0,03	3,77
100 - 200		0,75	0,01	1,87
Média		0,75	0,02	2,82
0 - 100	60 km/h	0,88	0,02	2,60
100 - 200		0,86	0,03	2,91
Média		0,87	0,02	2,76

Tabela 6 – Avaliação da repetitividades do índice de RMS de aceleração vertical calculado a cada 100 metros para um total de 10 viagens na rodovia PR-493

Segmento (m)	Velocidade	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV (%)
0 - 100	40 km/h	0,82	0,04	4,62
100 - 200		0,75	0,06	8,11
200 - 300		0,85	0,05	5,95
300 - 400		0,83	0,08	9,26
400 - 500		0,77	0,06	8,31
Média		0,80	0,06	7,25
0 - 100	60 km/h	1,03	0,02	2,12
100 - 200		0,94	0,03	3,19
200 - 300		1,16	0,07	5,66
300 - 400		1,08	0,07	6,40
400 - 500		0,92	0,06	6,23
Média		1,03	0,05	4,72

Tabela 7 – Avaliação da repetitividade do índice de RMS de aceleração vertical calculado a cada 100 metros para um total de 10 viagens na rua analisado do bairro Dona Matilde

Segmento (m)	Velocidade	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV (%)
0 - 100	40 km/h	0,79	0,06	7,90
Média		0,79	0,06	7,90
0 - 100	60 km/h	0,62	0,03	4,55
Média		0,62	0,03	4,55

De uma maneira geral, como o RMS é calculado de acordo com a quantidade de sinais obtidos pelo *smartphone*, este pode ser influenciado por diversos fatores, como por exemplo: a velocidade do veículo, o nível de irregularidade e defeitos no pavimento, a vibração do motor do automóvel e também onde o dispositivo é alocado para realizar a medições, assim como a dificuldade em se manter as mesmas condições de coleta, como coincidir os pontos de início e término no segmento, e também a posição lateral do carro dentro da faixa.

Como os trechos apresentavam diferentes inclinações e situações superficiais diferentes, pôde-se notar uma grande variação dentre os valores médios calculados de RMS. O valor máximo de coeficiente de variação encontrado foi de 12,78% para a estrada da empresa Sementes Guerra, justamente nas viagens a 40 km/h, nas quais se apresentaram dificuldades para se manter a constância na velocidade, devido à inclinação da via. Já o mínimo

foi encontrado a 60 km/h na rua Irineu Parzianello, onde foi facilitada a velocidade constante visto que a via apresentava declividade.

Na bibliografia pesquisada, Buttler e Islam (2014) encontraram valores baixos para coeficientes de variação, quando também analisaram a repetitividade de índice de irregularidade medidos por meio de um *smartphone*, abaixo de 20% em 3 dos 40 segmentos de, aproximadamente, 160 metros, escolhidos em seus estudos, depois de 5 viagens em cada subtrechos.

De outra forma, para se verificar se seria possível utilizar subtrechos de 100 metros, os índices de RMS, assim como seus respectivos desvios padrão e coeficientes de variação, foram calculados a cada 50 metros, também para as 10 viagens nos trechos. As Tabelas 8, 9, 10, 11 e 12 apresentam os resultados destes cálculos para a via da empresa Sementes Guerra, rua Irineu Parzianello, rua Benjamim Borges dos santos, rodovia PR-493 e a rua do bairro Dona Matilde, respectivamente.

Tabela 8 – Avaliação da repetitividade do índice de RMS calculado a cada 50 metros para um total de viagens na empresa Sementes Guerra

Segmento (m)	Velocidade	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV (%)
0-50	40 km/h	0,74	0,12	15,60
50-100		0,97	0,18	18,99
100-150		0,85	0,13	15,19
150-200		0,92	0,16	17,24
200-250		0,90	0,17	18,43
250-300		0,90	0,16	17,71
300-350		0,92	0,12	13,33
350-400		0,81	0,20	24,69
400-450		0,91	0,15	16,86
450-500		0,97	0,15	15,37
Média		0,89	0,15	17,34
0-50	60 km/h	0,67	0,04	6,13
50-100		0,70	0,04	6,23
100-150		0,69	0,04	5,96
150-200		0,83	0,04	4,53
200-250		0,84	0,04	4,65
250-300		0,67	0,07	10,62
300-350		0,64	0,03	5,09
350-400		0,64	0,03	4,41
400-450		0,80	0,07	8,96
450-500		0,79	0,05	6,19
Média		0,73	0,05	6,28

Tabela 9 – Avaliação da repetitividade do índice de RMS de aceleração vertical calculado a cada 50 metros para um total de 10 viagens na rua Irineu Parzianello

Segmento (m)	Velocidade	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV (%)
0-50	40 km/h	1,13	0,10	9,02
50-100		1,28	0,12	9,38
100-150		1,30	0,08	6,44
150-200		1,20	0,13	11,13
Média		1,23	0,11	8,99
0-50	60 km/h	1,14	0,02	2,00
50-100		1,40	0,05	3,42
100-150		1,29	0,05	3,67
150-200		1,28	0,07	5,75
Média		1,28	0,05	3,71

Tabela 10 – Avaliação da repetitividade do índice de RMS de aceleração vertical calculado a cada 50 metros para um total de 10 viagens na rua Benjamim Borges dos Santos

Segmento (m)	Velocidade	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV (%)
0-50	40 km/h	0,70	0,03	4,26
50-100		0,79	0,06	7,47
100-150		0,78	0,03	3,57
150-200		0,72	0,03	4,55
Média		0,74	0,04	4,96
0-50	60 km/h	0,88	0,03	3,48
50-100		0,88	0,04	4,24
100-150		0,89	0,04	4,66
150-200		0,84	0,04	4,69
Média		0,87	0,04	4,27

Tabela 11 – Avaliação da repetitividade do índice de RMS de aceleração vertical calculado a cada 50 metros para um total de 10 viagens na rodovia PR-493

Segmento (m)	Velocidade	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV (%)
0-50	40 km/h	0,72	0,04	5,25
50-100		0,92	0,06	6,74
100-150		0,77	0,08	10,74
150-200		0,76	0,08	10,58
200-250		0,79	0,07	8,84
250-300		0,93	0,07	7,43
300-350		0,79	0,13	16,26
350-400		0,81	0,06	7,00
400-450		0,66	0,07	10,42
450-500		0,86	0,08	9,10
Média		0,80	0,07	9,24
0-50	60 km/h	1,02	0,02	1,93
50-100		1,03	0,03	2,79
100-150		0,94	0,04	3,73
150-200		0,93	0,03	3,15
200-250		1,08	0,03	3,24
250-300		1,23	0,13	10,60
300-350		1,10	0,10	8,99
350-400		1,06	0,12	11,11
400-450		0,86	0,12	13,97
450-500		0,93	0,16	17,27
Média		1,02	0,08	7,68

Tabela 12 – Avaliação da repetitividade do índice de RMS de aceleração vertical calculado a cada 50 metros para um total de 10 viagens na rua avaliada do bairro Dona Matilde

Segmento (m)	Velocidade	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV (%)
0-50	40 km/h	0,85	0,08	8,96
50-100		0,74	0,05	7,38
Média		0,79	0,07	8,17
0-50	60 km/h	0,67	0,05	6,92
50-100		0,56	0,02	3,96
Média		0,61	0,03	5,44

Como pode ser visualizado nas tabelas acima, os coeficientes de variação cresceram consideravelmente, quando comparados aos calculados para os subtrechos de 100 metros.

Exceto para o trecho inicial da via da Empresa Sementes Guerra, onde a manutenção da velocidade foi mais difícil, pode-se considerar que a repetitividade dos valores obtidos para RMS de aceleração vertical calculados

para o *smartphone Samsung Galaxy S7 Edge* é aceitável, e de certa forma, suficiente para o gerenciamento a nível de rede. Na pesquisa realizada por Hanson *et al.* em 2014, os autores comentam a classificação do IRI para os trechos analisados por Sayers e Karamihas (1998), e mencionam o caso das pistas de aeroportos, nas quais se espera valores entre 0 a 2 m/km para este índice, desta forma, uma pequena variação nestes locais não comprometeria as classificações em coletas a nível de rede. Somando-se a isso, ao se basear no limite de 5% para o coeficiente de variação de um perfilômetro inercial, definido pela ASTM E 1364, pode-se considerar que valores entre 5 a 10% em coletas realizadas com *smartphones*, são admissíveis.

4.4 CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS OBTIDOS PELO MÉTODO NÍVEL E MIRA E PELOS SMARTPHONES

Foram elaborados gráficos de dispersão com os dados de IRI obtidos pelo levantamento topográfico com Nível e Mira e os valores de RMS de aceleração vertical, calculados com os sinais registrados pelo *smartphone Galaxy S7 Edge*, com o intuito de se analisar a correlação destas variáveis, para os 1500 metros somados entre os cinco trechos analisados, subdivididos a cada 100 metros. Os valores de RMS representam a média destes índices, calculados entre as 10 viagens realizadas em cada trecho e velocidade.

A seguir, nas Figuras 75 e 76, estão as relações entre os valores de IRI e os de RMS de aceleração vertical, para as duas velocidades operacionais utilizadas em cada segmento (40 km/h e 60 km/h). Nestes gráficos, estão apresentados os coeficientes de determinação R-quadrado e de correlação R de Pearson (calculados pelo *software Microsoft Excel*) e a equação da linha de tendência que cruza a origem (RMS, IRI).

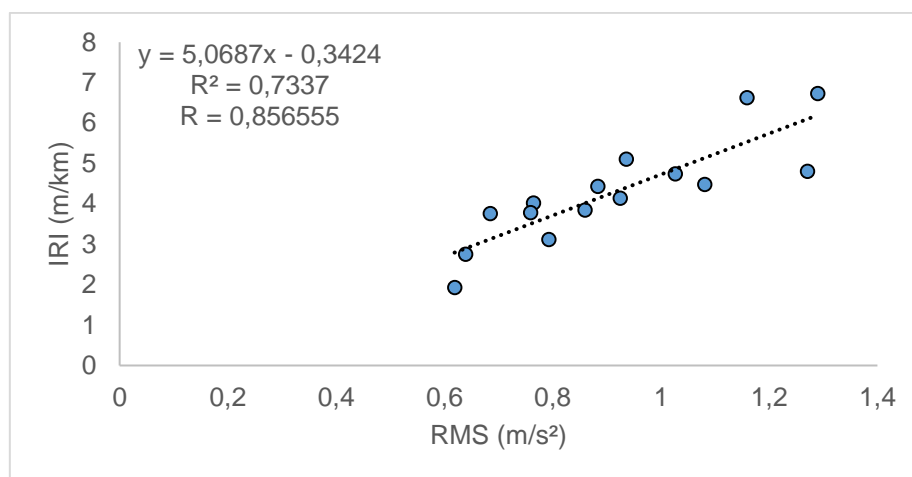


Figura 75 – Correlação entre IRI obtido pelo método Nível e Mira e RMS (smartphone), para todos os segmentos de coleta, com velocidade de 60 km/h
Fonte: Própria, 2018.

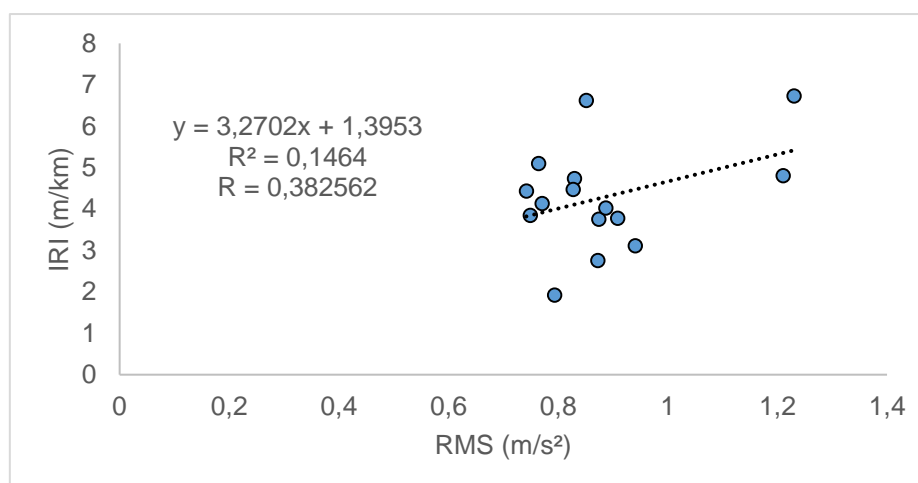


Figura 76 – Correlação entre IRI obtido pelo método Nível e Mira e RMS (smartphone), para todos os segmentos de coleta, com velocidade de 40 km/h
Fonte: Própria, 2018.

Pode-se observar que a melhor correlação entre os valores de IRI obtidos pelo levantamento topográfico com Nível e Mira, e os índices de RMS calculados com os sinais de acelerações verticais registrados pelo *smartphone*, ocorre para a velocidade de 60 km/h, onde o R de Pearson é de aproximadamente 0,86 e o de determinação R-quadrado, aproximadamente 0,73. Já a correlação para a velocidade de 40 km/h foi comprometida devido a alguns fatores, como as variações no trecho da empresa Sementes Guerra, onde não foi possível alcançar uma velocidade constante devido à inclinação do local, e também devido ao fato de que em velocidades baixas, as irregularidades do pavimento exercem menor influência no sistema de suspensão do veículo, e

desta forma, o sistema tem menor capacidade para medir os variados comprimentos de onda presentes no perfil do pavimento, que colaboram com os índices de irregularidade.

Além disso, como apresentado por Gillespie *et al.* (1980), a velocidade operacional limite para a utilização de medidores RTRRMS é de aproximadamente 25 km/h, visto que em baixos valores de velocidade, o veículo deixa de sentir os efeitos de comprimentos de onda maiores, assim, diminuindo o nível de irregularidade. Sayers e Karamihas (1998) explicam esta limitação, comentando que deve ser visto como o extremo inferior para análises típicas, como a obtenção do IRI, já que neste caso o interessante é medir justamente os comprimentos de onda maiores, e, portanto, devem ser usadas velocidades maiores.

Como o sistema baseado em *smartphones* trabalha como um medidor do tipo resposta, isto é, não mede diretamente o perfil do pavimento, existe influência de diversos fatores externos, que modificam os resultados obtidos, como os ruídos gerados pelo motor do veículo (dependendo do porte do automóvel, é mais sentido em menores velocidades), pelo próprio dispositivo e também pela movimentação do suporte veicular, que mesmo sendo fixado, ainda assim apresenta vibrações com o movimento.

Por consequência, o ruído gerado pelos *smartphones* causam maiores efeitos conforme a velocidade diminui, comprometendo a leitura da irregularidade real do pavimento. Considerando-se este fato, compreende-se que este seja o motivo de outras pesquisas sobre a utilização destes dispositivos tenham utilizado velocidades maiores, resultando em índices de correlação melhores nestas situações, como é o caso de Forslof (2013), que realizou as coletas a 80 e 100 km/h.

Os baixos valores dos coeficientes obtidos pela correlação do IRI com o RMS calculado com os sinais registrados a 40 km/h podem ser interpretados como uma confirmação desta limitação de velocidade. Somado a estes efeitos, mesmo que a velocidade de referência tenha sido de 40 km/h, é válido lembrar da diferença na leitura mostrada pelo velocímetro e a velocidade real do veículo. Desta forma, as coletas foram realizadas em velocidades ainda menores que os 40 km/h que já representam um valor baixo.

Da mesma forma, foram elaborados gráficos de dispersão para realizar a correlação com os índices medidos a cada 50 metros, mostrados nas Figuras 77 e 78, com as velocidades de 40 km/h e 60 km/h, respectivamente.

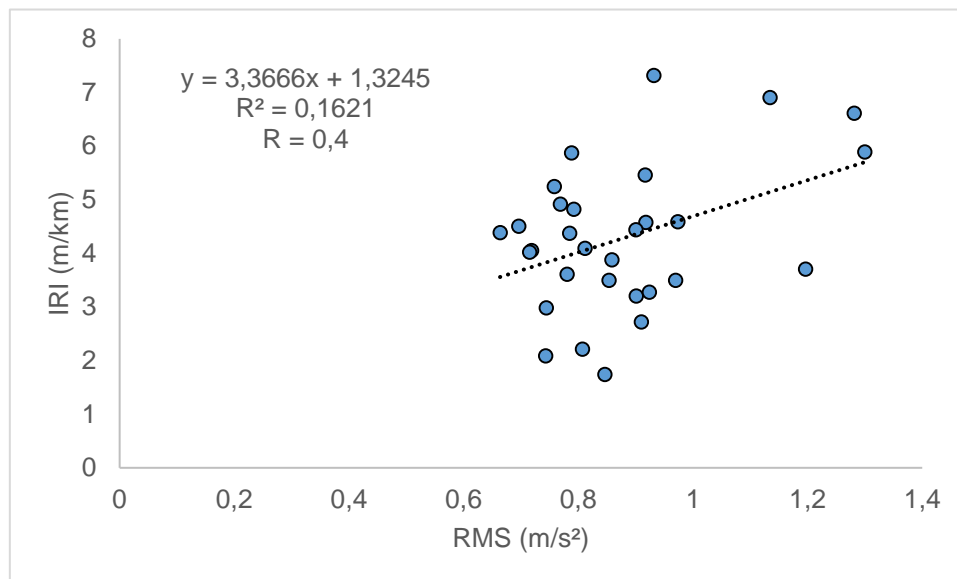


Figura 77 – Correlação entre IRI obtido pelo método Nível e Mira e RMS (smartphone), para todos os segmentos de coleta, com velocidade de 40 km/h
Fonte: Própria, 2018.

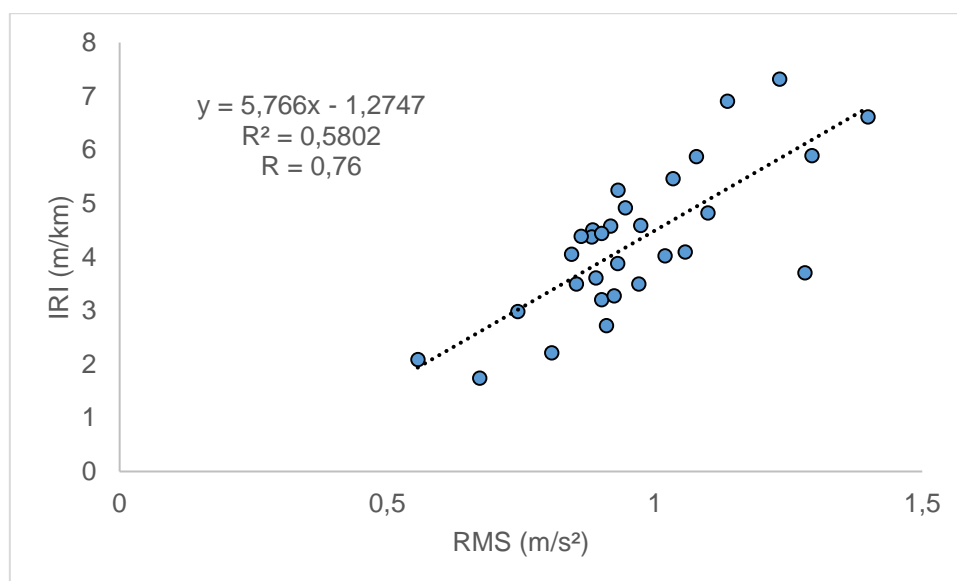


Figura 78 – Correlação entre IRI obtido pelo método Nível e Mira e RMS (smartphone), para todos os segmentos de coleta, com velocidade de 60 km/h
Fonte: Própria, 2018.

Nota-se que, apesar das correlações entre os valores de IRI e os de RMS não serem iguais a 1 (correlação exata), tanto a 100 quando a 50 metros, mostrou-se uma tendência em uma faixa intermediária de irregularidade, com os melhores resultados na velocidade de 60 km/h, como pode ser observado pelos

maiores valores de R e R-quadrado nesta situação. Porém, o modelo gerado para a velocidade de 40 km/h pode ser lido como uma confirmação da sensibilidade do sistema à ruídos externos e erros aleatórios, não gerados pela irregularidade do perfil do pavimento.

Como mostrado por Gillespie *et al.* (1980), a relação entre a velocidade e os índices obtidos por um sistema medidor do tipo resposta, depende não somente da superfície do pavimento, mas também das próprias características do equipamento, assim, conclui-se que a sensibilidade do medidor em relação à velocidade operacional varia conforme a estrada analisada.

De uma forma geral, como os trechos analisados se diferenciam por suas características próprias, como as irregularidades presentes e a inclinação, o sistema de medição por meio de *smartphones* aplicado nesta pesquisa, também mostrou grande sensibilidade em relação às velocidades operacionais utilizadas, tendo as maiores variações quando da combinação destes fatores que alteram os resultados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho realizou uma análise da utilização de smartphones para a avaliação da qualidade de rolamento por meio do índice de irregularidade internacional, motivado pelo baixo custo de aplicação de um sistema baseado nestes dispositivos, facilidade de operação e alta produtividade.

Para a concretização deste objetivo, foram coletados dados em cinco trechos com variados níveis de irregularidade, nos quais foram obtidos valores de aceleração vertical registrados por um *smartphone Samsung Galaxy S7 Edge* fixado ao para-brisa de um veículo modelo *Ford Fiesta Sedan*, por meio de um suporte, em duas velocidades diferentes (40 e 60 km/h). Os sinais obtidos foram utilizados para o cálculo de índices de irregularidade em termos da raiz da média quadrática RMS (*Root Mean Square*). Para a validação dos resultados, e calibração do sistema, foram realizados levantamentos topográficos pelo método Nível e Mira, para a obtenção de índices de irregularidade longitudinal de referência.

Os resultados das correlações realizadas indicam a sensibilidade do sistema quando em baixas velocidades, mas também mostram que os *smartphones* são capazes de gerar um modelo de coleta de dados relacionados à irregularidade longitudinal, especialmente para gerência a nível de rede, sendo mais eficazes em velocidades maiores, como é o caso dos 60 km/h empregados nesta pesquisa.

Durante os levantamentos em campo, foram encontradas dificuldades em alguns pontos, como manter o veículo todo o tempo na mesma posição em relação às trilhas de roda, iniciar e finalizar as medições com o *smartphone* no mesmo ponto, manter a velocidade constante, principalmente no trecho inclinado da empresa Sementes Guerra, falhas na aquisição de dados pelo aplicativo UTFPR-PB-USP. Também foram percebidas as influências das baixas velocidades nas coletas. Para o caso das viagens a 40 km/h, visto que a velocidade real é abaixo da mostrada no velocímetro, estes efeitos foram ainda mais evidentes.

Mesmo com algumas restrições, alcançaram-se valores satisfatórios de RMS calculados a partir dos sinais registrados pelo *smartphone Samsung Galaxy S7 Edge*, para a velocidade de 60 km/h, tanto em termos de repetitividade, quanto na correlação com o IRI calculado com o emprego do método Nível e Mira.

Os resultados desta pesquisa mostram que, ainda que com o dobro da taxa de aquisição de dados na maioria das pesquisas (200 Hz, para este trabalho), desta forma melhorando a capacidade de registro do perfil e alcançar índices mais precisos, este aumento na quantidade de sinais obtidos em taxas maiores (como, por exemplo, 500 Hz), pode se tornar um obstáculo para filtragem destes sinais, a menos que se tenha um sistema automatizado para o tratamento destes valores.

Faz-se válido lembrar que a maior limitação na utilização de um RTRRMS (sistemas medidores do tipo resposta), como é o caso do utilizado nesta pesquisa, é a necessidade de calibração por um método que faça a leitura direta do perfil, como o método Nível e Mira, uma vez que o sistema de suspensão do veículo trabalha como um “filtro” das irregularidades do pavimento, desta forma, o *smartphone* faz a leitura da reação em relação à pista. Portanto, o resultado

varia de acordo com o modelo de veículo utilizado, assim como a velocidade operacional empregada.

Como já mencionado, para a obtenção de índices de irregularidade de referência para a calibração do sistema tipo resposta, foi empregado o método Nível e Mira, com a participação mínima de duas pessoas, uma para direcionar o nível e registrar os dados e a outra para segurar a régua com a mira na posição adequada. Durante os primeiros levantamentos na via da empresa Sementes Guerra, houve a participação de cinco pessoas para facilitar o processo. Já as últimas coletas destes dados foram realizadas com apenas duas pessoas, com o auxílio de um gabarito, demarcado a cada cinquenta centímetros, o que acelerou o procedimento, sendo possível coletar os 1000 metros restantes em cinco dias. Com isto, foram contabilizados 1500 metros de extensão, medidos nas duas trilhas de rodas, a cada cinquenta centímetros, totalizando aproximadamente 6000 pontos registrados.

Para a calibração de um sistema tipo resposta por meio do método Nível e Mira, a norma DNER-ES 173/86 exige a coleta de dados em 20 trechos de 320 metros, o que se mostra impraticável para um trabalho deste nível, e dificulta a produtividade, visto o tempo que seria necessário para estes levantamentos.

Ainda que exista a influência destes fatores externos, os resultados obtidos nesta pesquisa servem como indicativo do potencial da utilização de *smartphones* como alternativo a outros sistemas de medição mais caros. Este sistema tem um grande potencial inexplorado de obtenção de grandes quantidades de dados e gerar uma vasta gama de informações para os usuários, que pode ser empregada em sistemas de gerência em nível de rede.

Para países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, este método pode ser utilizado por órgãos públicos, a fim de se manter um banco de dados atualizado, com custos reduzidos. Já em outras regiões, onde existe a utilização de metodologias diferentes, os *smartphones* poderiam ser empregados para complementar as coletas com estes equipamentos. O acompanhamento da variação dos índices de irregularidade poderia servir como base comparativa para estes medidores, visto que, mesmo que apresentem uma grande repetitividade, isto não se traduz necessariamente em resultados corretos.

Considerando-se principalmente os valores médios de RMS nas viagens a 60 km/h, a repetitividade destes sinais está em um nível aceitável para sistemas de gerência em nível de rede, com coeficientes de variação médios entre 2,76 e 7,90%, após 10 viagens. Estes valores apresentam uma boa correlação com o IRI calculado pelo método de Nível e Mira, quando consideradas todas as faixas de irregularidade avaliadas, excetuando-se alguns pontos de IRI, devido a possíveis erros durante as medições.

Concluindo-se, os *smartphones* se mostram como uma possível e promissora alternativa para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos, especialmente para o gerenciamento em nível de rede, no qual a administração trabalha com informações relacionadas a toda a malha viária, auxiliando as decisões da agência, em questões de planejamento, programação de investimentos e atividades de manutenção, por exemplo, principalmente devido ao seu baixo custo, facilidade de operação e alto potencial de aquisição de dados, visto que existe uma constante melhoria e aperfeiçoamento dos seus componentes e sensores, e seu uso cada vez mais comum por parte da população.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF THE STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO. **Guide for Design of Pavement Structures**. Washington D.C., Estados Unidos da América, 1993

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Measuring Road Roughness by Static Level Method**. ASTM E 1364. Estados Unidos da América, 1995.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements**. ASTM D 4695 Estados Unidos da América, 2015

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard Guide for Priorization of Data Needs for Pavement Management**. ASTM E 1777 Estados Unidos da América, 1996.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements**. ASTM E 1926. Estados Unidos da América, 1998.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard Practice for Calibration of Systems Used for Measuring Vehicular Response to Pavement Roughness**. ASTM E 1448. Estados Unidos da América, 1992.

ARRB GROUP LTD. **Site da empresa na Internet**. Disponível em <http://www.arrb.com.au>. Acesso em julho de 2018.

BARELLA, R. M. **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, 2008.

BASÍLIO, Rafael. **Análise do Comportamento de Pavimentos de Rodovias Estaduais de Goiás**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 187 p., 2002.

BEEBY, S. P.; ENSELL, G.; KRAFT, M. **MEMS Mechanical Sensors**. Artech house inc., United States of America, 2004. Disponível em: <<https://www.pdfdrive.com/mems-mechanical-sensors-e2460147.html>> Acesso em junho de 2018.

BELZOWSKI, B.; EKSTROM, A. **Evaluating Roadway Surface Rating Technologies**. Technical Report. University of Michigan Transportation Research Institute and the Michigan Department of Transportation. United States of America, 2015. Disponível em <<https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/111891/103192.pdf?sequence=1&isA>> Acesso em julho de 2018.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Petrobras/Abeda, Rio de Janeiro, RJ, 504 p., 2008.

BISCONSINI, Danilo Rinaldi. **Avaliação da Irregularidade Longitudinal dos Pavimentos com Dados Coletados por Smartphones**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2016.

BORGER, C. B. S. **Estudo Comparativo entre Medidas de Deflexão com a Viga Benkelman e FWD em Pavimentos da Malha Rodoviária de Santa Catarina**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2001.

BRIDGELALL, R. M.; RAHMAN, M. T.; TOLLIVER, D.D.; DALEIDEN, J. F. **Use of Connected Vehicles to Characterize Ride Quality**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Washington D. C., Estados Unidos da América, 2016.

BUTTLAR, William G.; ISLAM, Shahidul. **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., United States of America, 2012.

CAREY, W. N.; IRICK, P. E. **The Pavement Serviceability-Performance Concept**. Highway Research Bulletin, No. 250, United States of America, 1960.

CHATTI, Karim; ZAABAR, Imen. **Estimating the Effects of Pavement Condition on Vehicle Operating Costs**. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., Estados Unidos da América, 2012.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2017**: relatório gerencial, 21ª edição. CNT, SEST e SENAT. Brasília, DF. 2017.

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

CUNHA, Carlos Roberto. **Determinação de Modelo de Deterioração dos Pavimentos para a malha rodoviária estadual do Ceará**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2008.

DEL ROSARIO, M. B.; REDMOND, S. J.; LOVELL, N. H. **Tracking de Evolution of Smartphone Sensing for Monitoring Human Movement**. Sensors, vol. 15, 2015

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, RJ, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **Método de Nível e Mira para calibração de Sistema Medidores de Irregularidade Tipo Resposta.** DNER-ES 173/86. Ministério dos Transportes. Espírito Santo, ES, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman.** DNER-ME 24/94. Ministério dos Transportes. Rio de Janeiro, RJ, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT. **Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis, DNER-PRO 011/79.** Rio de Janeiro, RJ, 1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos, 2ª Edição.** Ministério dos Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT. **Manual de Gerência de Pavimentos.** Ministério dos Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, RJ, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT. **Relatório dos Levantamentos Funcionais das Rodovias Federais.** Brasília-DF, 2013.

DEY, S.; ROY, N.; XU, w.; CHOUDHURY, R. R.; NELAUDITI, S. **AccelPrint: Imperfections of Accelerometers Make Smartphone Trackable.** Briefing Papers UCAM-CL-TR-696, University of Illinois and University of South Carolina.

Estados Unidos da América, 2014. Disponível em: <http://synrg.csl.illinois.edu/papers/AccelPrint_NDSS14.pdf> Acesso em julho de 2018.

DOUANGPHACHANH, V.; ONEYAMA, H. **A Study on the Use of Smartphones Under Realistic Settings to Estimate Road Roughness Condition**. In Proceedings of the 13th International Conference on ITS Telecommunications, 2013. Disponível em <<https://link.springer.com/article/10.1186/1687-1499-2014-114>> Acesso em julho de 2018.

DOUANGPHACHANH, V.; ONEYAMA, H. **Using Smartphones to Estimate Road Pavement Condition**. In International Symposium for Next Generation Infrastructure. Wollongong. Austrália, 2014. Disponível em: <<http://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1017&context=isngi2013>> Acesso em julho de 2018.

FACE COMPANIES. **Site da empresa na Internet**. Disponível em: <http://www.faceco.com>. Acesso em julho de 2018.

FIGUEIREDO, L. J.; GAFANIZ, A. R.; LOPES, G. S.; PEREIRA, R. **Aplicações de Acelerómetros**. Monografia, IAS. Lisboa, Portugal, 2007.

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

GEEM, C. V.; BELLEN, M.; BOGAERTS, B.; BEUSEN, B.; BERLÉMONT, B.; DENYS, T.; MEULENAERE, P.; MERTENS, L.; HELLINCKX, P. **Sensor on vehicles (SENSOVO) – proof-of-concept for road surface distress detection with wheel accelerations and Tof câmara data collected by a fleet of ordinary vehicles**. 6th Transport Research Arena. Transportatation Research Procedia. Warsaw, Polônia, 2016.

GILLESPIE, T. D.; SAYERS M., W.; SEGEL, L. **Calibration of Response-Type Road Roughness Measuring Systems**. NCHRP, 1980.

GILLESPIE, Thomas D. **Everything You Always Wanted to Know about the IRI, but Were Afraid to Ask!** In: Road Profiler user Group Meeting, Lincoln, Estados Unidos da América, 1992.

GILLESPIE, Thomas D.; PATERSON, William D. O.; SAYERS, Michael W. **Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements**. World Bank, 1986.

HAAS, R.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. **Modern Pavement Management**. Krieger Publishing Company. Florida, Estados Unidos da América, 1994.

HANSON, T. R.; CAMERON, C.; HILDEBRAND, E. **Evaluation of low-cost consumer-level mobile phone technology for measuring international Roughness index (IRI) values**. Canadian Journal of Civil Engineering. Canadá. 2014.

HIGGINS, S. **Photogrammetry-Based Bid Wins Out Over Lidar-Based Proposals**. SPAR3D, Portland, Estados Unidos da América, 2011. Disponível em <https://www.spar3d.com/news/software/fugro-roadware-lands-two-year-3m-mobile-data-collection-contract/> Acesso em junho de 2018.

IHS, A. **The Influence of Road Surface condition on Traffic Safety and Ride Comfort**. The 6th International conference on managing pavements, Swedish National Road and Transport Research Institute, Suécia, 2004.

JANANI, L.; SABU, P. **Smartphone Based Pavement Condition Assesment**. IARJSET, National Conference on Emerging trends in Engineering and Technology. Lourdes Matha College of Science & Technology. Thiruvananthapuram, Índia, 2016.

JIMÉNEZ, L. A.; MATOUT, N. **A low cost solution to assess road's roughness surface for Pavement Management.** Transportation Research Board - TRB 2014 Annual Meeting. Washing D.C., Estados Unidos da América, 2014.

KARAMIHAS, S. M.; GILLESPIE, T. D.; PERERA, R. W.; KOHNS, S. D. **Guidelines for Longitudinal Pavement Profile Measurement.** National Cooperative Highway Research Program. Washington, D. C., Estados Unidos da América, 1999.

KING, Bernie-Anne. **The Effect of Road Roughness on Traffic Speed and Road Safety.** University of Southern Queensland – Faculty of Health, Engineering and Sciences, Queensland, Austrália, 2014.

LABORATÓRIO DE DINÂMICA E SIMULAÇÃO VEICULAR – LDSV. **O que é a Irregularidade do Pavimento?** Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica. Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, Brasil, 2018. Disponível em http://www.usp.br/ldsv/?page_id=217 Acesso em junho de 2018.

LAY, Maxwell G. **Ways of the World: a History of the World's Roads and of the Vehicles That Used Them.** Rutgers University Press. Estados Unidos da América, 1992.

LESS, Ronald D. **Measurement of Pavement Surface Variations.** Iowa State Highway Commission. Materials Department Central Laboratory. Iowa, Estados Unidos da América, 1974.

MARCON, Antônio Fortunato. **Contribuição ao Desempenho de um Sistema de Gerência de Pavimentos para a Malha Rodoviária Estadual de Santa Catarina,** Tese de Doutorado., ITA, São José dos Campos, SP, 1996.

MORAES, J. L.; BESSA, J. A.; NETO, E. C.; MOURA, L. B.; ALEXANDRIA, A. R. de. **Sistema de Aquisição de Dados para a Máquina de Impacto Charpy**. 2014.

NIETSCHE, P.; GEEM, C. V.; STÜTZ, R.; MOCANU, I.; SJÖGREN, L. **Monitoring Ride Quality on Roads With Existing Sensors in Passenger Cars**. 26th ARRB Conference. Sydney, Austrália, 2014.

PATERSON, William D. O. **Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management. The Highway Design and Maintenance Standard Series**. The World Bank, 1987.

PERERA, R. W.; KOHN, S. D. **Issues in Pavement Smoothness**. National Cooperative Highway Research Program. Estados Unidos da América, 2002.

PHOENIX SCIENTIFIC INC. (2004) **Pavement Profile Scanner (PPS) White Paper**. Disponível em: http://www.phnx-sci.com/PPS/Downloads_files/PPS%20Technology%20%282004%29.pdf. Acesso em junho de 2018.

PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA E TRANSPORTES – PNLT. **Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas do PNLT**. Relatório Final. Secretaria de Política Nacional de Transportes – SPNT/MT. Brasília, 2012.

SAYERS, Michael W.; GILLESPIE Thomas D.; QUEIROZ Cesar A. V. **The International Road Roughness Experiment Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements**. The World Bank. Washington D. C. Estados Unidos da América, 1986.

SAYERS, Michael W.; KARAMIHAS, Steven M. **The Little Book of Profiling**. Transportation Research Institute, University of Michigan, Estados Unidos da América, 1998.

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

SCHLOTJES, M. R.; VISSER, A.; BENNETT, C. **Evaluation of a Smartphone Roughness Meter**. Proceedings of the 33rd Southern African transport Conference – SATC 2014. Pretoria, África do Sul, 2014.

SILVA, L. L.; RODRIGUES, R. J.; CAZO, M. R.; CARVALHO, M. M.; PÁSSARO, A.; ALMEIDA, V. R. **Caracterização de Erros Sistemáticos em um Acelerômetro Micro-Eletrô-Mecânico Capacitivo**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São José dos Campos, SP, 2015.

SMITH, K. L. *et al.* **Smoothness Specifications for Pavements**. National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board. National Research Council. Estados Unidos da América, 1997. Disponível em: <http://www.nap.edu/books/nch001/html/R1.html>. Acesso em junho de 2018.

UNITED NATIONS – UN. **Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to Speedometer Equipment Including its Installation**. Geneva, 1958

WOODSTROM, J. H. **Measurements, Specifications and Achievements of Smoothness for Pavement Construction**. Transportation Research Board, Washington D.C., Estados Unidos da América, 1990.

ZENG, H.; SMITH, B. L.; PARK, H.; PARKANY, E. **A Connected Vehicle-Based Application to Estimate Road Roughness**. Center for Transportation Studies – University of Virginia, Estados Unidos da América. 2014. Disponível em: <<https://slideplayer.com/slide/3388177/#>> Acesso em junho de 2018.

APÊNDICE

As Tabelas 13 a 16 apresentam os valores obtidos para o cálculo de RMS médio para a estrada da empresa Sementes Guerra.

Tabela 13 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV
0 - 100	0,98	1,06	0,79	0,79	0,91	0,87	0,91	0,92	0,72	0,79	0,87	0,10	11,68
100 - 200	0,89	0,90	0,88	0,76	1,05	0,92	0,92	0,95	0,76	0,84	0,89	0,09	9,70
200 - 300	0,92	1,00	0,84	0,91	0,95	0,89	1,00	0,87	0,67	1,05	0,91	0,11	11,71
300 - 400	0,69	0,89	0,92	0,82	0,98	0,76	0,95	0,71	0,87	1,13	0,87	0,13	15,34
400 - 500	0,61	0,83	0,90	1,03	1,02	0,89	1,07	0,95	1,02	1,10	0,94	0,15	15,48

Tabela 14 – Valores de RMS médios: Velocidade: 60 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV
0 - 100	0,68	0,72	0,71	0,65	0,76	0,69	0,67	0,69	0,63	0,64	0,68	0,04	5,62
100 - 200	0,74	0,76	0,76	0,79	0,77	0,77	0,82	0,74	0,77	0,74	0,76	0,03	3,38
200 - 300	0,74	0,72	0,79	0,78	0,84	0,79	0,76	0,73	0,67	0,76	0,76	0,04	5,92
300 - 400	0,65	0,66	0,64	0,64	0,67	0,63	0,62	0,65	0,65	0,60	0,64	0,02	3,12
400 - 500	0,77	0,80	0,79	0,85	0,78	0,84	0,83	0,80	0,73	0,74	0,79	0,04	4,82

Tabela 15 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV
0-50	0,52	0,78	0,70	0,62	0,89	0,71	0,89	0,77	0,72	0,83	0,74	0,12	15,60
50-100	1,24	1,28	0,87	0,92	0,94	1,02	0,93	1,05	0,72	0,75	0,97	0,18	18,99
100-150	1,02	0,97	0,82	0,76	0,97	1,02	0,77	0,79	0,78	0,64	0,85	0,13	15,19
150-200	0,75	0,83	0,94	0,76	1,12	0,81	1,13	1,08	0,74	1,02	0,92	0,16	17,24
200-250	0,69	0,86	0,86	0,84	0,98	0,83	1,13	1,05	0,65	1,12	0,90	0,17	18,43
250-300											0,90	0,16	17,71
300-350	1,11	1,11	0,82	0,97	0,91	0,94	0,85	0,63	0,68	0,98			
350-400	0,83	1,04	0,94	0,83	0,98	0,95	0,95	0,67	0,91	1,12	0,92	0,12	13,33
400-450	0,52	0,71	0,89	0,80	0,98	0,50	0,95	0,75	0,83	1,14	0,81	0,20	24,69
450-500	0,60	0,79	0,86	1,03	0,98	0,78	1,09	0,97	0,94	1,07	0,91	0,15	16,86
	0,62	0,87	0,95	1,02	1,05	0,99	1,06	0,91	1,11	1,13	0,97	0,15	15,37

Tabela 16 – Valores de RMS médios: Velocidade: 60 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV
0-50	0,68	0,66	0,69	0,64	0,75	0,69	0,65	0,66	0,59	0,64	0,67	0,04	6,13
50-100	0,70	0,77	0,73	0,65	0,77	0,69	0,70	0,72	0,67	0,64	0,70	0,04	6,23
100-150	0,70	0,74	0,67	0,70	0,65	0,68	0,77	0,65	0,71	0,64	0,69	0,04	5,96
150-200	0,77	0,77	0,84	0,87	0,87	0,85	0,88	0,81	0,82	0,83	0,83	0,04	4,53
200-250	0,82	0,82	0,86	0,87	0,85	0,91	0,84	0,81	0,77	0,86	0,84	0,04	4,65
250-300	0,66	0,62	0,71	0,68	0,83	0,63	0,68	0,64	0,56	0,65	0,67	0,07	10,62
300-350	0,65	0,64	0,65	0,66	0,68	0,61	0,62	0,68	0,60	0,59	0,64	0,03	5,09
350-400	0,65	0,67	0,62	0,62	0,66	0,66	0,61	0,61	0,69	0,61	0,64	0,03	4,41
400-450	0,85	0,83	0,69	0,89	0,72	0,88	0,84	0,80	0,76	0,73	0,80	0,07	8,96
450-500	0,77	0,76	0,88	0,80	0,84	0,79	0,82	0,79	0,70	0,76	0,79	0,05	6,19

As Tabelas 17 a 20 apresentam os valores obtidos para o cálculo de RMS médios para a rodovia PR-493.

Tabela 17 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV
0 - 100	0,82	0,77	0,80	0,78	0,83	0,83	0,80	0,84	0,90	0,79	0,82	0,04	4,62
100 - 200	0,73	0,75	0,70	0,71	0,83	0,74	0,71	0,70	0,88	0,78	0,75	0,06	8,11
200 - 300	0,81	0,80	0,96	0,87	0,85	0,81	0,84	0,80	0,89	0,89	0,85	0,05	5,95
300 - 400	0,73	0,95	0,90	0,85	0,74	0,78	0,74	0,87	0,79	0,89	0,83	0,08	9,26
400 - 500	0,73	0,90	0,69	0,74	0,76	0,75	0,85	0,84	0,74	0,74	0,77	0,06	8,31

Tabela 18 – Valores de RMS médios: 60 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV
0 - 100	1,03	1,05	1,00	1,04	1,01	1,06	1,00	1,01	1,01	1,05	1,03	0,02	2,12
100 - 200	0,91	0,92	0,88	0,94	0,94	0,99	0,95	0,93	0,92	0,96	0,94	0,03	3,19
200 - 300	1,22	1,06	1,20	1,18	1,20	1,20	1,20	1,18	1,04	1,12	1,16	0,07	5,66
300 - 400	1,10	1,07	1,06	0,95	1,08	1,15	1,13	0,99	1,10	1,18	1,08	0,07	6,40
400 - 500	0,92	0,96	1,01	0,95	0,92	0,88	0,88	0,83	0,90	1,01	0,92	0,06	6,23

Tabela 19 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV
0-50	0,74	0,64	0,7561	0,68	0,72	0,75	0,74	0,72	0,71	0,69	0,72	0,04	5,25
50-100	0,89	0,94	0,8521	0,88	0,94	0,92	0,86	0,95	1,06	0,88	0,92	0,06	6,74
100-150	0,71	0,93	0,7234	0,75	0,85	0,78	0,71	0,67	0,85	0,71	0,77	0,08	10,74
150-200	0,76	0,78	0,669	0,66	0,80	0,71	0,71	0,73	0,92	0,84	0,76	0,08	10,58
200-250	0,72	0,88	0,8057	0,80	0,74	0,77	0,77	0,67	0,83	0,90	0,79	0,07	8,84
250-300	0,89	0,99	1,0951	0,93	0,94	0,85	0,90	0,91	0,93	0,88	0,93	0,07	7,43
300-350	0,69	0,67	1,0177	0,90	0,70	0,72	0,67	0,97	0,77	0,81	0,79	0,13	16,26
350-400	0,77	0,82	0,7674	0,80	0,78	0,83	0,81	0,76	0,82	0,96	0,81	0,06	7,00
400-450	0,62	0,69	0,5624	0,62	0,72	0,65	0,60	0,80	0,70	0,69	0,66	0,07	10,42
450-500	0,83	0,92	0,7954	0,84	0,82	0,87	1,04	0,89	0,78	0,79	0,86	0,08	9,10

Tabela 20 – Valores de RMS médios: Velocidade: 60 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV
0-50	1,01	1,04	1,00	1,05	1,03	1,02	1,02	0,99	1,02	1,00	1,02	0,02	1,93
50-100	1,05	1,07	1,00	1,05	1,05	1,01	1,08	1,02	1,00	1,02	1,03	0,03	2,79
100-150	0,91	0,93	0,88	0,97	0,93	0,94	1,01	0,96	0,95	0,95	0,94	0,04	3,73
150-200	0,91	0,96	0,88	0,95	0,95	0,94	0,97	0,93	0,92	0,90	0,93	0,03	3,15
200-250	1,08	1,08	1,13	1,13	1,01	1,07	1,07	1,07	1,08	1,06	1,08	0,03	3,24
250-300	1,35	1,03	1,29	1,10	1,33	1,31	1,32	1,31	1,27	1,01	1,23	0,13	10,60
300-350	1,07	1,20	1,18	1,22	0,98	0,97	1,12	1,05	0,99	1,20	1,10	0,10	8,99
350-400	1,12	0,92	0,93	1,14	0,93	1,18	1,19	1,19	0,98	0,99	1,06	0,12	11,11
400-450	0,84	1,00	1,04	0,99	0,89	0,78	0,80	0,83	0,65	0,81	0,86	0,12	13,97
450-500	1,01	0,91	0,49	1,02	1,01	1,04	0,94	0,93	0,97	0,99	0,93	0,16	17,27

As Tabelas 21 a 24 apresentam os valores obtidos para o cálculo de RMS médios na rua Irineu Parzianello.

Tabela 21 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV
0 - 100	1,19	1,39	1,26	1,29	1,29	1,15	1,19	1,09	1,11	1,13	1,21	0,10	8,31
100 - 200	1,43	1,29	1,31	1,25	1,25	1,27	1,08	1,26	1,15	1,21	1,23	0,07	5,83

Tabela 22 – Valores de RMS médios: Velocidade 60 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV
0 - 100	1,30	1,28	1,29	1,27	1,23	1,26	1,28	1,23	1,29	1,26	1,27	0,02	1,95
100 - 200	1,40	1,31	1,26	1,25	1,28	1,26	1,31	1,26	1,30	1,27	1,29	0,04	3,47

Tabela 23 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV
0 - 50	1,01	1,32	1,23	1,20	1,16	1,06	1,19	1,02	1,04	1,12	1,13	0,10	9,02
50 - 100	1,35	1,46	1,29	1,38	1,45	1,23	1,18	1,16	1,19	1,14	1,28	0,12	9,38
100 - 150	1,39	1,31	1,41	1,23	1,36	1,32	1,15	1,36	1,22	1,26	1,30	0,08	6,44
150 - 200	1,48	1,27	1,17	1,27	1,26	1,19	1,01	1,13	1,06	1,12	1,20	0,13	11,13

Tabela 24 – Valores de RMS médios: Velocidade: 60 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV
0 - 50	1,14	1,11	1,14	1,16	1,13	1,14	1,10	1,14	1,17	1,11	1,14	0,02	2,00
50 - 100	1,44	1,44	1,44	1,38	1,31	1,38	1,45	1,33	1,41	1,41	1,40	0,05	3,42
100 - 150	1,39	1,30	1,34	1,28	1,29	1,26	1,31	1,27	1,27	1,22	1,29	0,05	3,67
150 - 200	1,41	1,31	1,14	1,21	1,27	1,26	1,32	1,24	1,32	1,33	1,28	0,07	5,75

As Tabelas 25 a 28 apresentam os valores obtidos para o cálculo de RMS médios na rua Benjamim Borges dos Santos.

Tabela 25 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV (%)
0 - 100	0,67	0,74	0,76	0,74	0,76	0,72	0,75	0,75	0,77	0,76	0,74	0,03	3,77
100 - 200	0,74	0,75	0,73	0,75	0,74	0,75	0,73	0,77	0,74	0,77	0,75	0,01	1,87

Tabela 26 – Valores de RMS médios: Velocidade: 60 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV (%)
0 - 100	0,90	0,90	0,87	0,88	0,91	0,90	0,85	0,90	0,85	0,86	0,88	0,02	2,60
100 - 200	0,86	0,85	0,87	0,84	0,88	0,89	0,89	0,85	0,86	0,81	0,86	0,03	2,91

Tabela 27 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV
0 - 50	0,70	0,69	0,72	0,64	0,67	0,67	0,74	0,71	0,70	0,73	0,70	0,03	4,26
50 - 100	0,64	0,79	0,79	0,84	0,84	0,77	0,77	0,78	0,84	0,79	0,79	0,06	7,47
100 - 150	0,78	0,78	0,77	0,78	0,78	0,81	0,72	0,81	0,82	0,78	0,78	0,03	3,57
150 - 200	0,71	0,72	0,70	0,73	0,71	0,69	0,77	0,74	0,66	0,76	0,72	0,03	4,55

Tabela 28 – Valores de RMS médios: Velocidade: 60 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV
0 - 50	0,91	0,92	0,91	0,84	0,90	0,90	0,84	0,90	0,88	0,84	0,88	0,03	3,48
50 - 100	0,90	0,88	0,82	0,93	0,91	0,91	0,86	0,91	0,83	0,87	0,88	0,04	4,24
100 - 150	0,93	0,88	0,91	0,90	0,90	0,94	0,91	0,88	0,82	0,83	0,89	0,04	4,66
150 - 200	0,78	0,88	0,85	0,84	0,87	0,83	0,87	0,82	0,91	0,79	0,84	0,04	4,69

As Tabelas 29 a 32 apresentam os valores obtidos para o cálculo de RMS médios na rua do bairro Dona Matilde.

Tabela 29 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV
0 - 100	0,83	0,95	0,76	0,75	0,74	0,79	0,79	0,77	0,81	0,74	0,79	0,06	7,90

Tabela 30 – Valores de RMS médios: Velocidade: 60 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV
0 - 100	0,58	0,64	0,58	0,59	0,60	0,63	0,61	0,63	0,62	0,63	0,62	0,03	4,55

Tabela 31 – Valores de RMS médios: Velocidade: 40 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV
0 - 50	0,86	1,06	0,81	0,83	0,82	0,81	0,82	0,82	0,84	0,80	0,85	0,08	8,96
50 - 100	0,79	0,84	0,72	0,70	0,67	0,77	0,76	0,74	0,78	0,67	0,74	0,05	7,38

Tabela 32 – Valores de RMS médios: Velocidade: 60 km/h

Segmento (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RMS Médio (m/s ²)	DP	CV
0 - 50	0,63	0,69	0,60	0,63	0,65	0,71	0,72	0,75	0,69	0,66	0,67	0,05	6,92
50 - 100	0,53	0,60	0,56	0,54	0,54	0,55	0,55	0,55	0,55	0,59	0,56	0,02	3,96