



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS RUSSAS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**IAN MATEUS GUIMARÃES BRAÚNA**

**ESTUDO SOBRE O USO DE *SMARTPHONES* NA ESTIMATIVA DO ÍNDICE  
DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DOS PAVIMENTOS**

**RUSSAS**

**2020**

IAN MATEUS GUIMARÃES BRAÚNA

ESTUDO SOBRE O USO DE *SMARTPHONES* NA ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE  
IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DOS PAVIMENTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do  
Campus de Russas da Universidade Federal do  
Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Msc. Camila Lima Maia

RUSSAS

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

B835e Braúna, Ian Mateus Guimarães.

Estudo sobre o uso de smartphones na estimativa do índice de irregularidade longitudinal dos pavimentos / Ian Mateus Guimarães Braúna. – 2020.  
72 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2020.  
Orientação: Prof. Me. Camila Lima Maia.

1. Irregularidade longitudinal dos pavimentos. 2. Smartphones. 3. Índice de irregularidade longitudinal.  
4. Sistema de Gestão de Pavimentos (SGP). I. Título.

CDD 620

---

IAN MATEUS GUIMARÃES BRAÚNA

ESTUDO SOBRE O USO DE *SMARTPHONES* NA ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE  
IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DOS PAVIMENTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do  
Campus de Russas da Universidade Federal do  
Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
título de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. M<sup>a</sup>. Camila Lima Maia (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. M<sup>a</sup>. Andriele Nascimento de Souza  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. M<sup>a</sup>. Daniela Lima Machado da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Inácio e Gláucia.

Aos meus familiares e amigos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço sinceramente a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração deste trabalho. De maneira particular, expresso minha gratidão:

- A Deus por me conceder força e inspiração nos momentos mais difíceis e estar ao meu lado ao longo de todo este percurso;
- À minha orientadora e professora Camila Maia pela paciência, dedicação, apoio e empenho inestimáveis para a realização deste trabalho;
- Aos meus pais, Inácio Braúna e Maria Gláucia, por todo o apoio e por tudo que sempre com tanto amor fizeram para minha formação cultural e humana;
- Aos meus irmãos, Denis Júnior e Maria Eduarda, pelos conselhos e momentos de apoio;
- Ao meu colega de curso Renan Rocha por me auxiliar na realização do nivelamento topográfico;
- Aos meus colegas e amigos Paulo Sérgio, Thalyta Gomes, Larisse Gama e Rayanne Sousa pelo companheirismo, suporte e momentos de felicidade ao longo de toda a graduação.

## RESUMO

A pavimentação de vias de circulação de veículos tem como função primordial aprimorar o tráfego e a experiência durante a operação das mesmas pelos motoristas. Contudo, com o passar de sua vida útil, o pavimento sofre uma degradação progressiva em função das intempéries e da atuação do tráfego que, associada a falta de um gerenciamento efetivo da qualidade do pavimento, leva a um aumento na quantidade de vias em más condições, um cenário comum a rodovias brasileiras. Visando identificar maneiras de tornar a avaliação da irregularidade do pavimento de maneira eficiente, prática e de baixo custo, o presente trabalho consiste na avaliação dos *smartphones* como uma potencial ferramenta na determinação do índice de irregularidade longitudinal (IRI). A análise foi realizada mensurando o índice de irregularidade longitudinal de dois trechos de 100 metros das rodovias CE-356 e CE-377 através do método do Nível e Mira. Essas medições iniciais de IRI foram utilizadas como valores de referência, a fim de serem correlacionadas com os valores RMSVA, índice relacionado a irregularidade do pavimento e que mede as movimentações verticais sofridas pelo veículo. Tal parâmetro é determinado através de sinais de aceleração vertical captados por um *smartphone* fixado ao painel de um veículo que percorreu os mesmos trechos do sistema do Nível e Mira. Os resultados de correlação, através dos coeficientes de Pearson (R), para o trecho da CE-377 (R=0,78) e CE-356 (R=0,40) mostraram que apesar de necessitarem de um sistema de calibração, os *smartphones* se apresentam como uma alternativa viável, de baixo custo e de grande potencial em um sistema de gerência de pavimentos.

**Palavras-chave:** Irregularidade longitudinal dos pavimentos. Smartphones. Índice de irregularidade longitudinal. Sistema de Gestão de Pavimentos (SGP).

## **ABSTRACT**

The paving of vehicle roads has the primary function of improving the traffic and experience during the use of the same by its users. However, with the passing of its lifespan, the pavement undergoes a progressive degradation due to the weather and traffic performance, which, associated with the lack of effective management of the pavement quality, leads to an increased number of roads in bad conditions, a common scenario of Brazilian highways. In order to identify means to make the evaluation of the pavement roughness an efficient, practical and low cost process, the present work consists of the evaluation of smartphones as a potential tool in the determination of the international roughness index (IRI). The analysis was carried out by measuring the international roughness index of two stretches of 100 meters of the CE-356 and CE-377 highways using the Rod and Level method. These initial IRI measurements were used as reference values, in order to be correlated with the root mean square vertical acceleration (RMSVA) values, a parameter related to the pavement roughness and that measures the vehicle vertical movements. This parameter is determined through vertical acceleration signals captured by a smartphone fixed to the dashboard of a vehicle that travelled those same stretches of the Rod and Level system. The correlation results, through Pearson's coefficients (R), for the stretch of CE-377 (R=0.78) and CE-356 (R=0.40) showed that despite the need of a calibration system, smartphones are presented as a viable alternative, of low cost and of great potential in a pavement management system.

**Keywords:** Longitudinal roughness of pavements. Smartphones. International roughness index. Pavement Management System (PMS).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de ilustração da Irregularidade Longitudinal .....	19
Figura 2 – Faixas de IRI e correlação com diferentes tipos de pavimentos.....	25
Figura 3 – <i>Viagraph</i> : um dos aparelhos primordiais para determinação da irregularidade.....	26
Figura 4 – Desenho esquemático do método de Nível e Mira .....	28
Figura 5 – Exemplo de equipamento <i>Dipstick</i> e esquema de funcionamento .....	29
Figura 6 – Aparelho MERLIN .....	30
Figura 7 – O (esquerda) analisador de perfil longitudinal (APL) e o (direita) <i>Walking Profilometer</i> .....	30
Figura 8 – Rugosímetro BPR .....	31
Figura 9 – Mays Ride Meter .....	32
Figura 10 – Perfilômetro inercial a laser (esquerda) e o ARAN (direita).....	33
Figura 11 – Interface dos aplicativos <i>Waze</i> (esquerda) e <i>StreetBump</i> (direita) .....	34
Figura 12 – Esquema do simulador Quarto-de-Carro .....	39
Figura 13 – Esquema de determinação da Raiz da Aceleração Vertical Média Quadrática.....	41
Figura 14 – Estrutura de um acelerômetro instalado em <i>smartphones</i> .....	43
Figura 15 – Sistema de coordenadas de um <i>smartphone</i> .....	44
Figura 16 – Vista aérea do trecho CE-356.....	48
Figura 17 – Levantamento topográfico com Nível e Mira na CE-356 .....	48
Figura 18 – Vista aérea do trecho na CE-377 .....	49
Figura 19 – Fotografia retirada da CE-377 .....	49
Figura 20 – Detalhe do painel do aplicativo AndroSensor .....	51
Figura 21 – Suporte veicular para smartphone fixado em para-brisa .....	52
Figura 22 – Suporte veicular para smartphone adotado fixado em saída de ar .....	53
Figura 23 – Veículo utilizado na coleta de dados .....	54
Figura 24 – Resultado do arquivo de medição pelo AndroSensor.....	55
Figura 25 – Calculadora Geográfica do INPE .....	55
Figura 26 – Rodovia CE-377 .....	60
Figura 27 – Rodovia CE-356 .....	60

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Índice de Irregularidade Longitudinal dos perfis de estudo .....	59
Gráfico 2 – Sinais de aceleração das rodovias CE-356 e CE-377 .....	61
Gráfico 3 – Correlação entre IRI e RMSVA para a rodovia CE-356 .....	63
Gráfico 4 – Correlação entre IRI e RMSVA para a rodovia CE-377 .....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Previsão de Custo Operacional de Veículos - Brasil .....	23
Tabela 2 – Constantes físicas do modelo de simulação do Quarto-de-Carro .....	40
Tabela 3 – Índices de Irregularidade Longitudinal do trecho da CE-377 (Equação de Barella 2008) .....	57
Tabela 4 – Índices de Irregularidade Longitudinal do trecho da CE-377 (Equação de Patterson 1986) .....	57
Tabela 5 – Índices de Irregularidade Longitudinal do trecho da CE-356 (Equação de Barella 2008) .....	58
Tabela 6 – Índices de Irregularidade Longitudinal do trecho da CE-356 (Equação de Patterson 1986) .....	58
Tabela 7 – Relação entre nível de trafegabilidade do pavimento e o IRI .....	59
Tabela 8 – Desvios padrão dos valores RMSVA para CE-356 .....	62
Tabela 9 – Desvios padrão dos valores RMSVA para CE-377 .....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
AVMQ	Aceleração Vertical Média Quadrática
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
APL	Analisador de perfil longitudinal
ARAN	<i>Automatic Road Analyser</i>
BPR	<i>Bureau of Public Roads</i>
CHLOE	<i>Carey, Huckins, Leathers and Other Engineers</i>
CNT	Confederação Nacional do Transporte
COV	Custo operacional veicular
HDM	<i>Highway Design and Maintenance Standards Model</i>
HSRI	<i>Highway Safety Research Institute</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LDI	Integrador de deslocamentos lineares sul-africano
<i>IRRE</i>	<i>International Road Roughness Experiment</i>
IRI	<i>International Roughness Index</i>
MERLIN	Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumentation
GMR	Perfilômetro Dinâmico de Superfície
QC	Quarto-de-Carro
QI	Quociente de Irregularidade
VA	Raiz da Aceleração Vertical Média Quadrática
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RMSVA	<i>Root Mean Square Vertical Acceleration</i>
SGP	Sistema de Gestão de Pavimentos
TRRL	Transport and Road Research Laboratory
VSA	Valor de Serventia Atual

## SUMÁRIO

1.	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1	<b>Problema de pesquisa</b> .....	14
1.2	<b>Questões de pesquisa</b> .....	15
1.3	<b>Hipótese de pesquisa</b> .....	15
1.4	<b>Justificativa</b> .....	16
1.5	<b>Objetivo geral</b> .....	17
1.6	<b>Objetivos específicos</b> .....	17
1.7	<b>Estrutura do trabalho</b> .....	17
2.	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	19
2.1	<b>Irregularidade longitudinal</b> .....	19
2.1.2	<i>Estudos de irregularidade e custos ao usuário</i> .....	22
2.2	<b>Desenvolvimento do Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI)</b> .....	24
2.3	<b>Equipamentos de medição da irregularidade longitudinal</b> .....	26
2.3.1	<i>Sistemas de medidas diretas do perfil</i> .....	27
2.3.2	<i>Sistemas de medidas indiretas do perfil</i> .....	29
2.3.3	<i>Sistemas medidores tipo-resposta</i> .....	31
2.3.4	<i>Sistemas de medidas com sonda sem contato</i> .....	32
2.4	<b>Smartphones e sensores móveis na avaliação da condição do pavimento</b> .....	33
2.5	<b>Escalas de medição da irregularidade longitudinal</b> .....	38
2.6	<b>Processamento de dados fornecidos por smartphones</b> .....	42
2.7	<b>Coeficiente de Pearson para correlação entre duas variáveis</b> .....	46
3.	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	47
3.1	<b>Obtenção dos índices de irregularidade de referência pelo Nível e Mira</b> .....	47
3.2	<b>Levantamento da irregularidade a partir de um smartphone</b> .....	50
3.2.1	<i>Avaliação e escolha do modelo de smartphone</i> .....	50
3.2.2	<i>Aplicativo empregado para a coleta de dados</i> .....	50
3.2.3	<i>Escolha do suporte do aparelho smartphone, veículo utilizado e coleta de dados</i> .....	51
3.2.4	<i>Processamento dos dados</i> .....	54
3.3	<b>Resumo do método</b> .....	56
4.	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	57
4.1	<b>Resultados obtidos em campo através do Nível e Mira</b> .....	57
4.2	<b>Resultados dos dados determinados através de um smartphone</b> .....	60

4.3	Correlação dos dados determinados pelo método do Nível e Mira e pelo <i>smartphone</i> .....	63
5.	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	66
5.1	Conclusões.....	66
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	67
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	68

## 1. INTRODUÇÃO

A pavimentação de vias de circulação de veículos tem como função primordial aprimorar o tráfego e a experiência dos motoristas durante a operação das mesmas. Uma vez que conforme é feita uma superfície mais aderente, pouco ruidosa e mais regular, tem-se uma garantia de melhor segurança, suavidade e conforto no deslocamento do veículo (BALBO, 2007).

Com o passar da vida útil do pavimento e sua conseqüente redução progressiva de qualidade, ocorre o surgimento de falhas conseqüentes da ação do tráfego e das intempéries que atuam na via. Tão logo, a fim de se manter um desempenho admissível do pavimento, informações a respeito de sua superfície e estrutura são relevantes na gestão da malha rodoviária, além de auxiliar os Sistemas de Gestão de Pavimentos (SGP), na tomada de decisões e melhor alocação de recursos públicos para a manutenção da mesma (VOGEL, 2015).

A regularidade da via, ou como é abordada no estudo de pavimentos, a irregularidade longitudinal, é um dos importantes indicadores na qualificação da malha, sendo o principal fator de influência na opinião pública sobre a qualidade da via, visto que é diretamente percebida pelos usuários através da aceleração vertical que o veículo sofre durante a sua locomoção (VOGEL, 2015).

Não apenas afetando o conforto e segurança de motoristas e passageiros, a vida útil do pavimento também pode ser reduzida devido à irregularidade longitudinal, isso porque os efeitos das cargas dinâmicas do tráfego, especialmente as de veículos pesados, aumentam nas saliências e depressões isoladas, acelerando a sua deterioração (BISCONSINI, 2016).

Este desgaste mais rápido da estrutura, sem as devidas manutenções, se reflete também no aumento de gastos por parte da administração pública com a restauração das vias. Da perspectiva do usuário, a existência de defeitos ou irregularidades na superfície favorecem também o desgaste do veículo, ocasionando em maiores custos operacionais como com peças de manutenção, consumo de combustível e de pneus e tempo de viagem (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Tendo em vista os problemas acarretados pela irregularidade longitudinal e a necessidade de se evitá-los, a determinação de um parâmetro que identifique o estado do pavimento quanto a este aspecto se torna importante. No final da década de 70, um dos primeiros parâmetros a serem utilizados foi o *Root Mean Square Vertical Acceleration*

(RMSVA), período no qual se buscou determinar também outros índices indicadores da irregularidade (BISCONSINI, 2016).

O *International Roughness Index* (IRI), formalizado pelo Banco Mundial na década de 80 e que possui uma correlação com o RMSVA, se trata de outro parâmetro desenvolvido, sendo o principal índice utilizado atualmente e para o qual foram desenvolvidos diferentes métodos de mensuração como o perfilômetro inercial a laser e o perfilômetro acústico (BARELLA, 2008).

Bisconsini (2016) afirma que a utilização destes sistemas de medição, apesar de apresentarem resultados exatos e precisos, requerem equipamentos sofisticados e onerosos, além de profissionais que possuam habilidade na operação dessas ferramentas. Por outro lado, a utilização de métodos estáticos não apresenta praticidade e rendimento para a avaliação de grandes extensões de rodovias, limitando a funcionalidade do IRI na análise de pavimentos.

Contudo, o advento de novas tecnologias nas últimas décadas, possibilitou o desenvolvimento de *smartphones* com sensores que podem ter potencial na aquisição de dados para a determinação dos valores de IRI, se apresentando como uma possível alternativa para o estudo do pavimento.

Deste modo, este trabalho busca avaliar a capacidade dos *smartphones* como instrumentos para a determinação do IRI, através da obtenção de dados RMSVA por aplicativo de *smartphone* e pelo cálculo do IRI através do método do nível e mira para dois trechos de irregularidade diferentes: um da CE-356 e o outro da CE-377. Uma vez tratados, o potencial dos *smartphones* será avaliado pela análise do grau de correlação dos dados obtidos pelos dois métodos.

## 1.1 Problema de pesquisa

Os equipamentos utilizados em métodos estabelecidos que permitem a determinação do IRI de maneira mais eficiente e precisa são bastante dispendiosos, além de exigirem operadores especializados, uma vez que não são tão simples de serem utilizados. A utilização de *smartphones* para este fim pode tornar estudos e avaliações de pavimentos, como os de Almeida (2018) e Forslof (2015), mais acessíveis e menos custosos.

Contudo, para que haja uma efetiva implantação da análise da irregularidade longitudinal através de *smartphones*, a precisão de seus sensores para esta finalidade deve ser averiguada. Existem estudos que apresentaram resultados positivos quanto a aplicação dos

mesmos e de outros aparelhos em conceitos similares, como na utilização de sensores *wireless* no monitoramento da infraestrutura de malhas ferroviárias (HODGE *et al.*, 2015), e no emprego do *smartphone* na identificação de lombadas (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

No entanto, ainda há poucos estudos no que se refere à sua confiabilidade na determinação da irregularidade longitudinal. Assim se faz necessária uma comparação e avaliação com um método mais consolidado, visando a validação e uma maior difusão dessa ferramenta na determinação do IRI.

## 1.2 Questões de pesquisa

Diante do que foi exposto, este trabalho visa responder às seguintes questões:

- a) A utilização de aplicativos para *smartphones* podem ser uma alternativa viável para a qualificação do pavimento?
- b) Quais fatores podem vir a influenciar nos dados obtidos pelo aplicativo de *smartphone*?
- c) Dados adquiridos através do *smartphone* são satisfatórios quando comparados a outros métodos já bem fundamentados?
- d) Quais contribuições a implementação desta tecnologia pode trazer na análise da qualidade de pavimentos?

## 1.3 Hipótese de Pesquisa

Mesmo que existam possíveis limitações no uso de *smartphones* para o acompanhamento contínuo do nível de irregularidade do pavimento, acredita-se que essa tecnologia possa ser amplamente aplicada.

Fatores intrínsecos aos aparelhos como a precisão e limitação da velocidade de aquisição de dados dos sensores, assim como foi observado nos estudos de Bisconsini (2016) e Almeida (2018), podem ser possíveis empecilhos que afetem a confiabilidade dos dados. Ao contrário de métodos mais estabelecidos como o perfilômetro inercial a laser, onde no estudo realizado por Albuquerque e Oliveira (2016), por exemplo, o equipamento podia adquirir até 4000 pontos por segundo e precisa medição do perfil longitudinal com a utilização de até 3 módulos laser. Contudo, para um acompanhamento eficiente da qualidade da irregularidade do pavimento em um sistema de gerência de pavimentos (SGP), não são necessários dados de IRI

extremamente precisos, mas que permitam uma classificação e acompanhamento da qualidade geral das rodovias para toda uma malha rodoviária.

Logo, um constante aprimoramento dos aplicativos e dos próprios *smartphones* pode permitir que estes venham a ser implementados como um novo instrumento para a obtenção do IRI no futuro. Possibilitando a implementação de um sistema de gerência de pavimentos em nível de rede em razão da rápida e econômica aquisição da base de dados, análise da qualidade de serviços executados após períodos de obra e eficiente monitoramento da evolução da irregularidade ao longo da vida de serviço do pavimento.

#### **1.4 Justificativa**

Para países em desenvolvimento como o Brasil, a utilização de métodos mais avançados para a avaliação dos pavimentos ainda é limitada pela infraestrutura e recursos públicos disponíveis, principalmente em jurisdições menores onde muitas vezes sequer são realizados. Desta maneira, estes acabam por depender de sistemas menos dispendiosos, mas que restringem a análise a pequenas extensões de rodovias, terminando por prolongar excessivamente o período de avaliação ou por limitá-la a apenas alguns trechos da via.

Todavia, com a necessidade de se atualizar os dados frequentemente, além do constante crescimento da malha rodoviária, surge a necessidade de se obter essas informações para a qualificação do pavimento de forma mais rápida, prática e com baixos custos.

Os *smartphones* podem proporcionar essa alternativa, visto que eles apresentam diferentes sensores que podem ser suficientes para realizar essas análises. Além disso, o número crescente de usuários possibilita a obtenção de uma ampla quantidade de dados sem grandes investimentos por parte da administração pública, que já se encontra financeiramente sobrecarregada apenas com a manutenção das vias.

Nesse sentido, o presente estudo justifica-se pela necessidade de se explorar o potencial do uso de *smartphones* na análise da irregularidade longitudinal dos pavimentos, mais especificamente na determinação do IRI, contribuindo para a difusão desta ferramenta e gestão mais eficaz e modernizada da malha rodoviária nacional.

## 1.5 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral determinar o potencial do uso de *smartphones* como ferramentas na obtenção de dados para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos (IRI).

## 1.6 Objetivos específicos

- Discutir sobre o funcionamento e operação do aplicativo Androsensor na determinação dos dados e do método de Nível e Mira, além de identificar como e quais possíveis variáveis podem vir a influenciar a avaliação de um pavimento;
- Obter dados da aceleração vertical ao qual o veículo está submetido através do método de Nível e Mira para dois trechos de rodovias, um da CE-377 e o outro da CE-356;
- Para os mesmos trechos da CE-377 e CE-356, obter dados da aceleração vertical imposta ao veículo com o aplicativo de *smartphone* Androsensor;
- Aferir a irregularidade longitudinal pelo método do Nível e Mira e os valores de RMSVA pelo aplicativo;
- Avaliar a capacidade dos *smartphones* na obtenção de dados RMSVA que sejam compatíveis com a irregularidade longitudinal dos pavimentos encontrada pelo método do Nível e Mira;
- Comparar e avaliar os estados de qualidade dos dois trechos quanto as classificações existentes do pavimento para diferentes valores de IRI.

## 1.7 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é constituído por 5 capítulos. O Capítulo 1 compreende a contextualização do tema, o problema de pesquisa, as questões de pesquisa, a hipótese admitida, a justificativa, o objetivo geral e específicos e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica a respeito do tema, sendo composto pela definição do IRI, pesquisas relacionadas à qualidade do pavimento, o desenvolvimento do IRI, definições de outros métodos de medição, a utilização dos *smartphones* como uma

ferramenta em outras áreas, escalas de medição da irregularidade e o processamento de dados de aceleração obtidos por *smartphones*.

O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos utilizados para a elaboração deste estudo, contemplando os trechos adotados, cuidados e recomendações na coleta de dados com os equipamentos de medição de Nível e Mira e do aplicativo de *smartphone*, escolhas do modelo e aplicativo de *smartphone* e o processamento de seus dados.

O Capítulo 4, que compõe os resultados e discussões, apresenta a análise comparativa dos resultados obtidos pelos dois métodos, a fim de se verificar a correlação de seus dados, além de avaliar os sinais de aceleração obtidos e a variabilidade dos dados de *smartphone*, definindo também se os mesmos apresentam potencial para aplicação como ferramenta na determinação da irregularidade do pavimento.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais, o que inclui as contribuições do presente estudo, e, por fim, proposições de trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

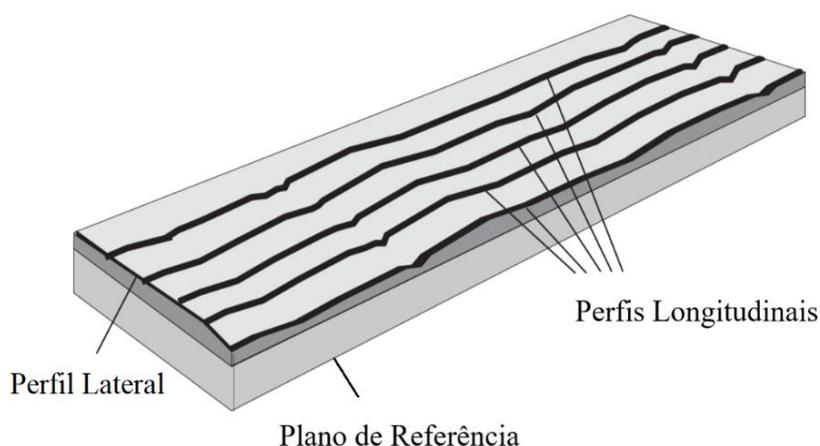
### 2.1 Irregularidade Longitudinal

Em âmbito nacional, a irregularidade de pavimentos possui definições de diferentes fontes, embora semelhantes. Uma delas é proveniente do Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2011) que define a irregularidade longitudinal como: “[...] o conjunto dos desvios da superfície do pavimento em relação a um plano de referência, desvios esses que afetam a qualidade do rolamento e a ação dinâmica das cargas sobre a via.”

Bernucci *et al.* (2008), de maneira mais específica, afirma: “[...] é o somatório dos desvios da superfície de um pavimento em relação a um plano de referência ideal de projeto geométrico que afeta a dinâmica do veículo, o efeito dinâmico das cargas, a qualidade ao rolamento e a drenagem superficial da via.”

Outro conceito é abordado pela norma brasileira DNER-PRO 164/94, onde se trata do: “[...] desvio da superfície da rodovia em relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade de rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via.” A Figura 1 ilustra uma representação da mesma.

Figura 1 – Esquema de ilustração da Irregularidade Longitudinal



Fonte: Adaptado de Sayers e Karamihas (1998).

Segundo Benevides (2006), vários fatores ocasionam o aumento da irregularidade no decorrer do tempo, os quais, podem ser em virtude da ação do tráfego, do meio ambiente

(temperatura, água) e de imperfeições no processo executivo do pavimento. As movimentações e esforços indesejáveis que atuam nos veículos devido à irregularidade longitudinal provocam uma condição de rolamento desconfortável, insegura e antieconômica.

Benevides (2006) cita também que a dinâmica dos veículos é prejudicada pelas distorções na superfície, causando desgaste, acréscimo do tempo de viagem e na manutenção. As distorções que geram as irregularidades têm notável influência no custo de operação dos veículos, provocando também, os deslocamentos verticais e laterais, ocasionados pelas respectivas acelerações. Sendo o principal desconforto dos usuários função dos deslocamentos verticais, que são originados das distorções longitudinais do perfil do pavimento.

Já os deslocamentos laterais, são responsáveis pela maior ação da carga dinâmica dos veículos, originados de movimentos do veículo para a direita e esquerda em torno de seu eixo longitudinal, são resultantes das diferenças de declividades transversais do pavimento e pelas curvas horizontais (BENEVIDES, 2006).

Assim como apontado em vários estudos nas últimas três décadas, a irregularidade da superfície do pavimento é considerada o mais importante indicativo de desempenho dos pavimentos, mas foi originalmente a partir dos estudos conduzidos pela AASHO (*American Association of State Highway Officials*), que Carey e Irick (1960) apresentaram o primeiro conceito de serventia-desempenho do pavimento, e do qual relacionaram a irregularidade longitudinal como sendo o seu principal fator determinante. Esta importância dada a irregularidade, e sua relação com a percepção do usuário da qualidade do pavimento, é legítima, visto que ela compromete o propósito inicial da construção do pavimento, que é proporcionar suavidade, conforto e segurança no rolamento (BISCONSINI, 2016).

Assim como abordado por BERNUCCI *et al.* (2008, p. 403), “O objetivo principal da pavimentação é garantir a trafegabilidade em qualquer época do ano e condições climáticas, e proporcionar aos usuários conforto ao rolamento e segurança.”

Para um bom desempenho funcional, a rodovia deve apresentar uma superfície com serventia adequada em termos de qualidade de tráfego. Essa serventia pode ser avaliada de forma subjetiva ou por medidas físicas correlacionáveis. O Manual de Gerência de Pavimentos do DNIT (2011) descreve o Índice de Irregularidade Longitudinal como um dos principais parâmetros utilizados para este fim (PINTO, 2018).

Este fato também é apontado por Benevides (2006):

“Dada a sua importância na percepção de conforto dos usuários, vários países adotam índices de serventia baseados exclusivamente em medições de irregularidade. A irregularidade longitudinal é, quase sempre, utilizada como fator decisivo na estimativa da vida útil do pavimento.”

Fernandes Jr. (1994 apud SONCIM, 2011) discorre sobre a forte correlação entre as formas de deterioração estrutural (trincas por fadiga e deformação permanente) e a irregularidade longitudinal, indicando que é bastante comum ambas ocorrerem simultaneamente no pavimento.

Essa correlação se dá em função de dois motivos: a ocorrência de trincas no pavimento permite a entrada de água e o enfraquecimento estrutural, que resulta na irregularidade longitudinal. O segundo motivo se trata da irregularidade que, devido a consolidação e deformações cisalhantes, acarreta cargas dinâmicas excessivas e rápida progressão de trincas. Essas causas também são confirmadas no postulado sobre mecanismos de deterioração dos pavimentos flexíveis estabelecido pelo AASHO *Road Test*:

O início das trincas e sua progressão geralmente estão associados a um certo grau de deformação permanente, sendo também, resultado da mudança na distribuição de tensões e perda de capacidade de carga, causada pela infiltração de água, com a irregularidade podendo ser atribuída a esse processo (SMEATON; SENGUPTA; HASS, 1980 apud SONCIM, 2011, p.33).

A correlação entre a irregularidade e a vida útil do pavimento é de grande importância a todos os gestores viários, principalmente ao se tratar de pavimentos novos ou recém-restaurados. Caso fosse determinado com exatidão o quanto se ganha em vida útil a cada diminuição de 1 m/km no valor de IRI, seria simples calcular até quanto um gestor pode ou deve pagar além do preço médio de mercado, seja para um serviço de recuperação ou construção que entregue o pavimento menos irregular (BARELLA, 2008).

Trabalhos bastante renomados, no que diz respeito a irregularidade, como Sayers *et al.* (1986), reforçam bastante a ideia de utilização da irregularidade em sistemas “avançados” de gerenciamento de pavimentos, buscando auxiliar na tomada de decisões e na determinação dos custos operacionais (BARELLA, 2008).

A aplicação do *smartphone* como uma ferramenta na análise do pavimento, caso reconhecida como uma alternativa mais acessível, pode facilitar a implantação desses sistemas de gerenciamento. O que seria de grande auxílio a órgãos rodoviários que, de maneira geral,

não detém a autonomia para definir a aplicação dos recursos financeiros para a conservação e manutenção da sua malha rodoviária sem estes sistemas.

### **2.1.2 Estudos de irregularidade e custos ao usuário**

Acerca de custos operacionais, vários trabalhos que analisaram a sua relação com as características do pavimento foram realizados, principalmente após a década de 70. Dentre eles, os mais reconhecidos e abrangentes foram sem dúvida os patrocinados pelo Banco Mundial em colaboração com entidades locais, em países em desenvolvimento, como: Quênia, Caribe, Brasil e Índia. Tais pesquisas desenvolveram modelos que foram empregados no *The Highway Design and Maintenance Standards Model* (HDM), *software* para tomada de decisão quanto à viabilidade construtiva e econômica dos investimentos em projetos rodoviários (Watanatada *et al.*, 1987 apud BARELLA, 2008).

Barella (2008), ainda aponta que dentre esses quatro estudos, aquele conduzido no Brasil foi o maior e mais extenso deles. Através do estudo brasileiro, realizado entre 1975 e 1984, é possível se ter uma ideia numérica, quanto à diminuição da velocidade média e da elevação de custos com o aumento da irregularidade longitudinal. Os dados utilizados para esta análise foram obtidos em Watanatada *et al.* (1987 apud BARELLA, 2008).

Para um caminhão grande com meia-carga, a velocidade média em um segmento pavimentado tangente e em nível, o modelo prevê uma redução da velocidade de 70 para 50 km/h para um aumento de irregularidade (QI) de 25 cont/km para 125 cont/km, isto é, de 1,9 m/km para 9,6 m/km em termos de IRI (Watanatada *et al.*, 1987 apud BARELLA, 2008).

Para a mesma variação de irregularidade, o aumento no consumo de pneus chegou a quase 15%. Quanto ao consumo de combustível, em trechos em curva o aumento foi de 5%, o aumento no custo de peças usadas na manutenção foi de 150% e a depreciação do veículo teve uma elevação de 22%, para as mesmas condições (Watanatada *et al.*, 1987 apud BARELLA, 2008).

Em outros estudos citados em L-P Tardif (1999 apud CAMPOS, 2004), para a diminuição de cada unidade do IRI, caminhões tinham uma redução de até 4% no consumo de combustível, enquanto que automóveis uma média de 1,5%, considerando rodovias de diferentes níveis de irregularidade. Para rodovias com IRI menor ou igual a 4,0 m/km, a irregularidade longitudinal tem um impacto na economia de combustível de até 6% para carros e 16% para caminhões.

Por outro lado, Mesquita (2001 apud ALMEIDA, 2018) afirma que o custo operacional veicular (COV) não pode ser interpretado como uma variável global, isto é, ele é bastante influenciado pelos parâmetros das rodovias da região como rugosidade, geometria horizontal, velocidade de operação, clima e outros. O ambiente econômico regional também deve ser considerado, principalmente os preços dos insumos para a produção do transporte, como combustível, pneus, mão de obra de manutenção dos veículos e peças.

Mesquita (2001 apud ALMEIDA, 2018), ainda aponta que fatores financeiros como preço dos veículos novos, impostos, depreciação, juros e despesas de pessoal, parâmetros bastante regionais, também devem ser considerados. Apesar do COV depender de parâmetros tão peculiares, foi desenvolvido no Brasil um modelo simplificado e de razoável precisão que representa as complexas características dos custos operacionais de veículos para uma determinada região.

Baseado em um dos estudos financiados pelo Banco Mundial entre 1976 e 1982, e realizado pela Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes – GEIPOT, Mesquita (2001 apud ALMEIDA, 2018) determinou os valores médios característicos da composição de custos operacionais de veículos para a realidade brasileira, apresentado na Tabela 1, da qual é possível perceber o aumento significativo dos custos para diferentes faixas de IRI e, especialmente conforme o aumento do porte dos veículos.

Tabela 1 – Previsão de Custo Operacional de Veículos - Brasil

<b>Veículos</b>	<b>IRI (m/km)</b>	<b>V (km/h)</b>	<b>COV (ano 2000) (R\$/km)</b>	<b>COV (ano 2017) (R\$/km)</b>
<b>Carros</b>	2,8	62,7	0,1748	0,51
	7,4	59,3	0,2362	0,72
	12,0	55,8	0,3214	0,96
<b>Ônibus</b>	2,8	72,1	0,7730	2,32
	7,4	54,7	0,9147	2,74
	12,0	43,6	1,1161	3,37
<b>Caminhões</b>	2,8	64,4	0,7757	2,35
	7,4	48,7	1,0600	3,19
	12,0	37,0	1,3569	4,10
<b>Articulados</b>	2,8	62,3	1,6160	4,88
	7,4	39,6	2,1442	6,44

Fonte: Almeida (2018).

Bester (2002 apud BISCONSINI, 2016) também destaca o impacto que a irregularidade dos pavimentos tem na segurança viária, modificando as forças normais que atuam na interface pneu-pavimento e alterando as forças laterais, fundamentais para o controle do veículo. Em pavimentos com nível de irregularidade menor, a variação da força normal é muito pequena. Contudo, em pavimentos mais irregulares, as variações podem ser grandes o suficiente para a redução da força lateral de forma significativa, necessária para manter a estabilidade do veículo. Em situações em que é necessário um nível de atrito lateral mínimo para se fazer uma manobra, a redução da força pode levar a acidentes.

Através desses exemplos, torna-se bastante evidente a necessidade de mensuração da irregularidade longitudinal dos pavimentos, tanto no que tange aos modelos de gerência como o HDM, quanto à redução de custos e prevenção de acidentes.

A relevância desse índice também vem sendo observada por alguns órgãos gestores de rodovias, que estabeleceram a irregularidade longitudinal como parâmetro de aceitação, para obras novas e para obras de recuperação de pavimentos existentes.

## **2.2 Desenvolvimento do Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI)**

De acordo com Vogel (2015), após a série de experimentos realizados através da *AASHO Road Test* no final da década de 50, vários estudos com o objetivo de determinar um parâmetro de medida para a irregularidade longitudinal foram conduzidos. As pesquisas financiadas pelo Banco Mundial na década de 70, que tinham como objetivo realizar uma investigação detalhada sobre a composição dos custos totais do transporte rodoviário, em função dos custos de execução e da manutenção e de utilização das estradas, são exemplos dos trabalhos desenvolvidos voltados para tal fim (SONCIM, 2011).

No entanto, não havia uma padronização nos diferentes estudos elaborados para caracterizar a irregularidade, onde muitos dos primeiros métodos não apresentavam dados uniformes. Além disso, cada um utilizava-se de diferentes equipamentos e procedimentos de medição, revelando que era necessário que houvesse um sistema capaz de determinar medidas compatíveis em quaisquer condições (SONCIM, 2011).

Com o intuito de regularizar esta medida, o Banco Mundial, em 1982, propôs uma pesquisa com o governo brasileiro chamada de *International Road Roughness Experiment* (IRRE), em português, Experimento Internacional de Rugosidade em Rodovias, que foi realizada em Brasília e tinha como finalidade encontrar uma correlação e um padrão de

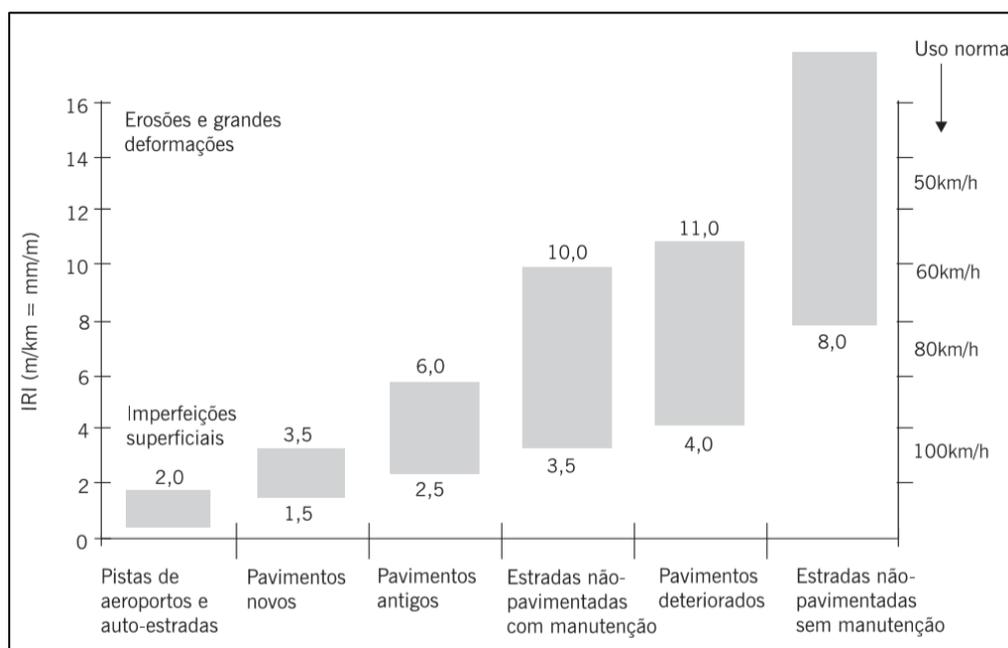
calibração para medidas de irregularidade em pavimentos para os diferentes métodos existentes (VOGEL, 2015).

O estudo foi conduzido por equipes do Brasil, Reino Unido, França, Estados Unidos e Bélgica, em que quarenta e nove locais de teste foram ensaiados com uma variedade de equipamentos e procedimentos de medição. Os resultados encontrados através do IRRE mostraram que era possível determinar um parâmetro padrão à maioria dos equipamentos em questão, onde esta medida passou a ser denominada *International Roughness Index (IRI)* (SONCIM, 2011).

Paterson (1986) afirma que o IRI se trata de um índice de referência que resume o perfil da estrada, baseando-se em um modelo matemático chamado quarto-de-carro, que simula as movimentações verticais induzidos a uma roda sob uma velocidade de 80 km/h. Os movimentos verticais que atuam na roda são acumulados e divididos pela distância percorrida, o que resulta em um índice com unidade m/km.

O IRI foi o primeiro parâmetro padrão para a medição de índices ligados às irregularidades amplamente utilizado, que permite ser correlacionado com diferentes tipos de medidores de perfil, podendo ser expresso em in/mi, contagens/km, entre outros (SONCIM, 2011). A Figura 2 apresenta diferentes faixas de IRI com base em tipos de pavimento e velocidade do veículo.

Figura 2 – Faixas de IRI e correlação com diferentes tipos de pavimentos



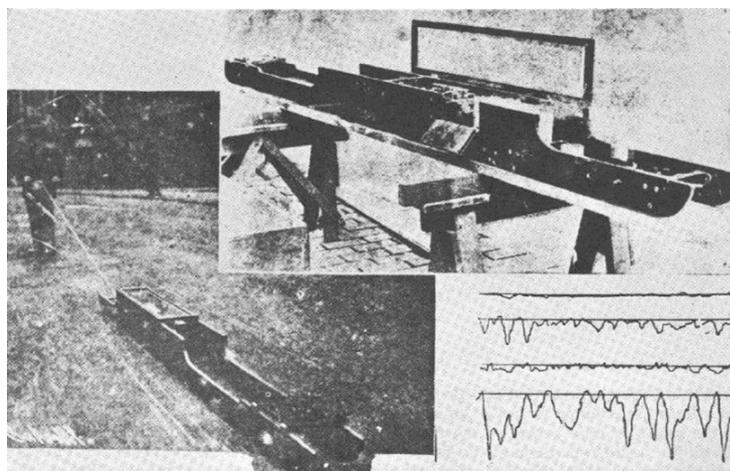
Fonte: Bernucci (2008).

A seguir, serão apresentados diversos aparelhos utilizados para o levantamento da irregularidade longitudinal dos pavimentos.

### 2.3 Equipamentos de medição da irregularidade longitudinal

O perfil da superfície do pavimento, mais especificamente sua irregularidade, é preocupação de engenheiros rodoviários desde muito tempo. No início do século XX, um engenheiro irlandês, J. Brown, inventou o primeiro equipamento de medição da irregularidade da superfície do pavimento, conhecido como *Viagraph* (Figura 3) (Nikolaides, 2015). Tratava-se de um aparelho rudimentar, que realizava um registro contínuo em papel com base no desvio medido no ponto central de uma régua de madeira, apoiada e arrastada sobre o pavimento longitudinalmente (Bisconsini, 2016).

Figura 3 – *Viagraph*: um dos aparelhos primordiais para determinação da irregularidade



Fonte: Bisconsini (2016).

O instrumento criado por Brown serviu de base para o desenvolvimento de perfilômetros mais sofisticados até o final da década de 60, alguns destes foram o perfilômetro da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e o perfilômetro CHLOE, nomeado a partir das iniciais de seus inventores. Uma variedade ainda maior de aparelhos foram desenvolvidos após a década de 60 (Nikolaides, 2015).

Segundo Echeverria (2011), existem diversos tipos de medidores de irregularidade que podem ser utilizados, os principais aspectos que os diferenciam e influem na escolha de um modelo são o porte do equipamento, que está diretamente relacionado ao custo de aquisição e

manutenção, velocidade de aquisição de dados, precisão e mão de obra.

Barella (2008) afirma que para a avaliação da irregularidade são quatro o número de equipamentos mais utilizados no Brasil: os medidores tipo-resposta, o método do Nível e Mira, Dipstick e o Merlin.

O manual de reabilitação de pavimentos asfálticos DNER 704/100 (1998) enquadra os equipamentos ou processos concebidos para a medição da irregularidade em quatro grupos: Sistemas de medidas diretas do perfil, Sistemas de medidas indiretas do perfil, Sistemas medidores tipo-resposta e Sistemas de medidas com sonda sem contato.

### ***2.3.1 Sistemas de medidas diretas do perfil***

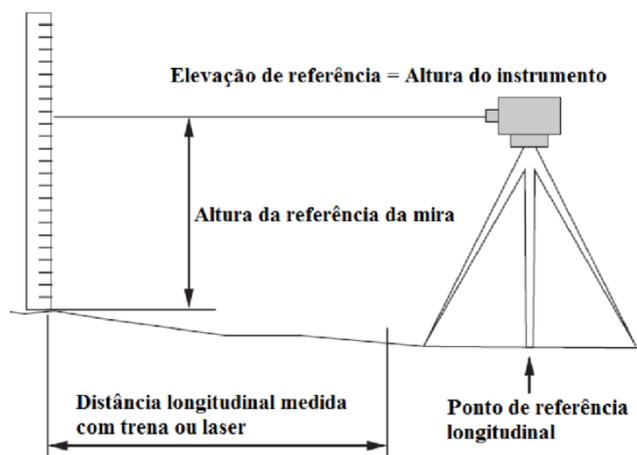
Os sistemas de medidas diretas, incluem medidas diretas ou manuais da geometria vertical do pavimento, através do emprego de instrumentos de topografia ou equipamentos adequados. Os dados obtidos devem ser tratados para fornecer valores estatísticos indicativos de irregularidade. Esses sistemas são geradores de alta precisão de medição do perfil, sendo constituídos como os mais exatos que existem na determinação da irregularidade longitudinal. Exemplos desta classe são o Método do Nível e Mira e o *Dipstick*.

A determinação da irregularidade longitudinal através do levantamento topográfico do perfil longitudinal feito por Nível e Mira (Figura 4) é o mais conhecido e disponível internacionalmente. Embora seja considerado um método trabalhoso e caro, geralmente é empregado para a calibração de outros equipamentos de maior produtividade, especialmente os medidores tipo-resposta, os quais dependem de uma escala de irregularidade de referência, assim como regulamentado na norma DNER-ES 173-86.

O método, como é possível influir por sua denominação, utiliza de um nível topográfico que se trata de uma ferramenta que mede desníveis e variações de relevo, podendo ser óptico, no qual a leitura é feita pelo operador em miras estádias, ou digital, onde o próprio equipamento através de uma mira com código de barras faz a leitura. O método de nivelamento empregado é o geométrico.

Este nivelamento consiste de visadas horizontais, das quais é definido um plano horizontal. Neste plano são estabelecidos intervalos de amostragem e a partir deles pontos de interseção, dos quais são obtidos os dados através da leitura da mira para a determinação do perfil longitudinal. O levantamento longitudinal é realizado nas trilhas de roda externa e interna, a cada 0,5 m.

Figura 4 – Desenho esquemático do método de Nível e Mira

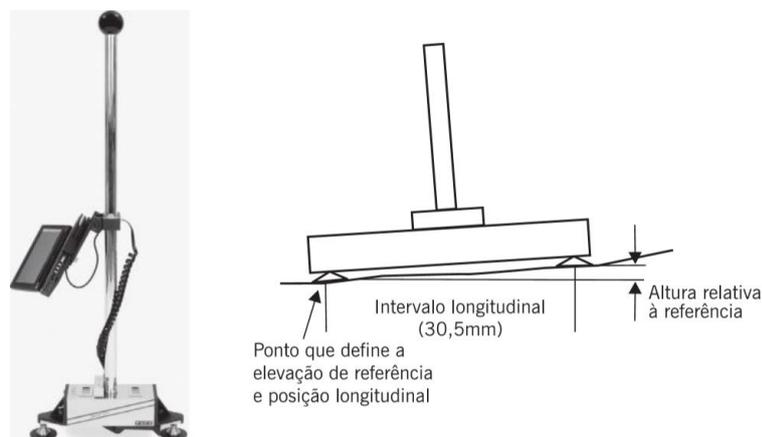


Fonte: Bisconsini (2016).

O estudo de Sayers (1995), que esclarece a respeito do cálculo do IRI pelo levantamento topográfico, aconselha que um intervalo de amostragem não deve ser maior que 0,3 m. Queiroz (1981 apud BISCONSINI, 2016), no entanto, realizou um estudo sobre o processo de obtenção de uma escala estável de irregularidade a partir do Nível e Mira, no qual o autor não encontrou diferenças significativas entre os valores medidos com intervalos de 0,1 até 0,5 m.

Quando se trata de perfilômetros portáteis, o *Dipstick* pode ser entendido como o precursor de uma categoria de equipamentos desenvolvidos na década de 90. Também utilizado para a calibração de outros equipamentos, o *Dipstick* consiste de um inclinômetro e um computador interno sobre uma base com dois suportes, onde o operador gira o aparelho em 180° em torno do segundo ponto de apoio, de tal modo que os dois apoios estão sempre em uma linha imaginária ao longo das trilhas de roda. A Figura 5 mostra uma foto do aparelho e seu funcionamento.

Figura 5 – Exemplo de equipamento *Dipstick* e esquema de funcionamento



Fonte: Adaptado de Bernucci (2008).

### 2.3.2 Sistemas de medidas indiretas do perfil

Esses realizam medidas de maneira mecânica do perfil. Os resultados encontrados devem ser processados para fornecer dados como comprimento de onda, coeficiente de regularidade, entre outros. Como exemplo, tem-se:

- Perfilômetro Dinâmico de Superfície (GMR);
- Perfilômetro AASHTO;
- Analisador de perfil longitudinal (APL);
- Perfilômetro CHLOE;
- MERLIN do TRRL.

Utilizado para a avaliação de pavimentos, ou calibração de medidores tipo-resposta, o MERLIN (Figura 6), *Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumentation*, do TRRL, *Transport and Road Research Laboratory*, se trata de uma estrutura metálica de 180 cm de comprimento, munido de uma roda na parte dianteira, uma ponta de prova e um pé traseiro. A ponta de prova, movimenta um braço mecânico, que se desloca sobre uma folha de papel de 5 x 5 mm, na qual são registrados os deslocamentos, e determinando o desnível entre os apoios extremos. O equipamento é guiado manualmente pelo operador ao longo de um alinhamento determinado, e os registros são efetuados em intervalos regulares.

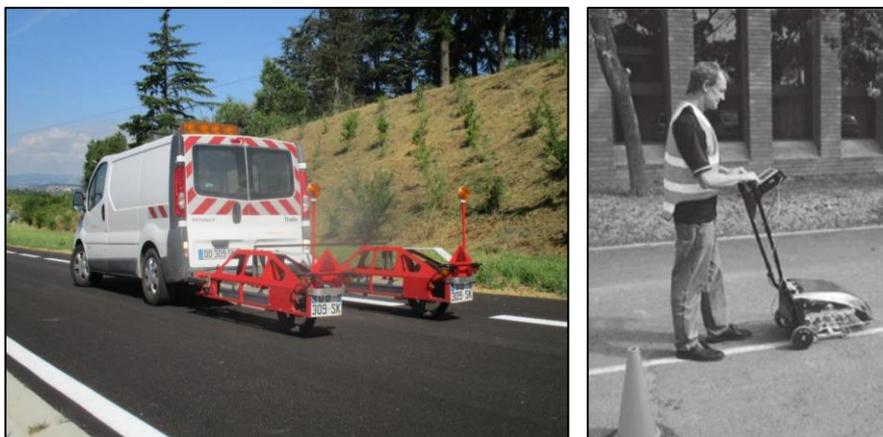
Figura 6 – Aparelho MERLIN



Fonte: Arteris ET 008 (2017).

Morrow *et al.* (2006 apud BISCONSINI, 2016) realizou um estudo comparativo, quanto a eficiência e custos, entre diferentes medidores de irregularidade. Os autores trabalharam com o z-250, com o *Walking Profilometer*, com o MERLIN, com o *Riley* e com o Nível e Mira. De acordo com sua análise, foi constatado que os inclinômetros estacionários, são relativamente caros e trabalhosos, além de serem extremamente sensíveis ao manuseio do operador.

O *Walking Profilometer* é mais simples e rápido de operar, no entanto mais caro. Já o MERLIN, obteve ótimo desempenho com boa precisão, apesar de não possuir grande portabilidade, como o *Riley*. O método do Nível e Mira, por sua vez, apesar de obter dados precisos, é uma técnica cara e trabalhosa. No final foi concluído que cada equipamento possui certas vantagens, cabendo a escolha ao critério do engenheiro. A Figura 7 mostra alguns equipamentos da categoria de sistemas de medidas indiretas.

Figura 7 – O (esquerda) analisador de perfil longitudinal (APL) e o (direita) *Walking Profilometer*

Fonte: (esquerda) Pinto (2018) (direita) Nikolaides (2015).

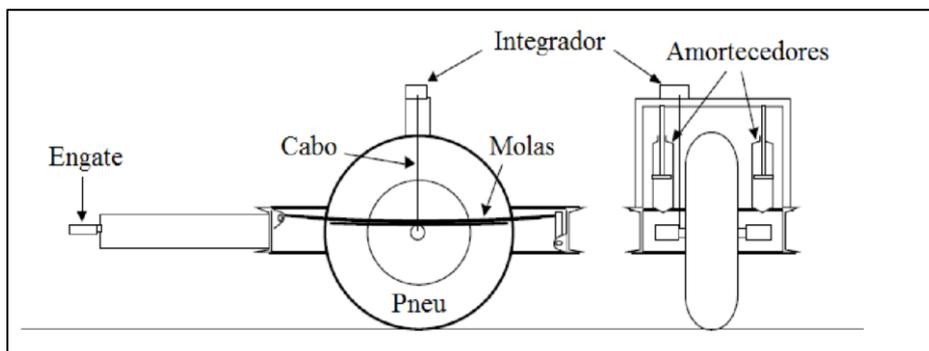
### 2.3.3 Sistemas medidores tipo-resposta

Também denominados geradores de perfil simples, neste grupo enquadram-se os métodos que recorrem ao uso de equações de correlação para a estimação dos valores de irregularidade longitudinal. Baseiam-se em equipamentos que determinam cumulativamente os movimentos relativos entre o eixo traseiro do veículo e sua carroceria, a partir do que, estatisticamente, pode-se caracterizar a irregularidade. Os sistemas tipo-resposta mais conhecidos são:

- Rugosímetro BPR;
- Maysmeter;
- Bump Integrator;
- Integrador de deslocamentos lineares sul-africano (LDI);
- PCA roadmeter;
- Sistema integrador IPR/USP.

O funcionamento da maioria dos medidores do tipo-resposta se dá através do mesmo conceito apresentado no equipamento desenvolvido pelo *Bureau of Public Roads* (BPR), ou Rugosímetro. Este aparelho se trata de um sistema de reboque com roda única (Figura 8), cujo mecanismo simula o modelo quarto-de-carro, sendo utilizado para medir a resposta às irregularidades e processar as informações sobre as movimentações verticais entre o eixo e o chassi do veículo, que são então reduzidas a um modelo estatístico, ou seja, um número que descreve a irregularidade do pavimento (SONCIM, 2011).

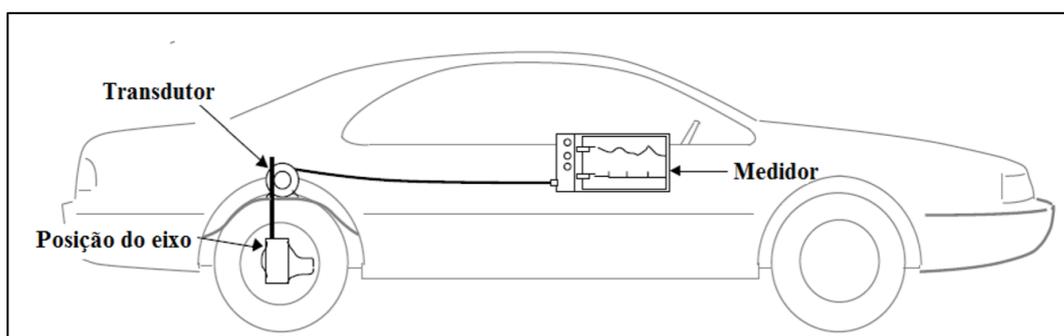
Figura 8 – Rugosímetro BPR



Fonte: Bisconsini (2016).

Embora se baseiem no conceito desenvolvido para o BPR, geralmente, os equipamentos medidores do tipo-resposta são montados em um veículo de passeio, como o apresentado na Figura 9. A medida da irregularidade longitudinal é obtida pelo somatório dos valores absolutos dos deslocamentos verticais e dividindo pela distância percorrida na rodovia (SONCIM, 2011).

Figura 9 – Mays Ride Meter



Fonte: Bisconsini (2016).

O aparelho do tipo-resposta mais utilizado no Brasil é o IPR/USP. Este equipamento é montado em um veículo de passeio médio e, conforme se desloca pela via, o integrador concede o somatório dos valores absolutos dos deslocamentos verticais de um ponto diferencial, em relação a carroceria do veículo. A medição de irregularidade pelo IPR/USP é normatizada pelo DNIT (DNER PRO 182/94 – DNER,1994) (BENEVIDES, 2006).

#### 2.3.4 Sistemas de medida com sonda sem contato

São os sistemas de medida que utilizam de sensores ótico, ultrassônico ou a laser que refletem de ondas sonoras ou o raio laser emitido por dispositivos fixados no veículo. Estes equipamentos digitais apuram dados do perfil em pontos discretos que são usados como informações de entrada para um programa de computador que calcula as elevações, distâncias e índices de irregularidade (BENEVIDES, 2006). Como exemplo destes equipamentos, tem-se:

- Perfilômetro Laser do TRRL;
- ARAN;
- DYNATEST MARK II RSP;
- Laser Road Surface Test;

Um dos tipos de sistemas de medida sem contato mais comuns são os perfilômetros inerciais a laser. Franco (2004 apud PINTO, 2018) define os perfilômetros como aparelhos utilizados na medição do perfil da superfície do pavimento, seja de modo contínuo ou em pequenos intervalos. O perfilômetro inercial a laser são dotados de um dispositivo de referência inercial (acelerômetro) que compensa os movimentos verticais do corpo do veículo medidor e gera uma linha de referência. Este, por sua vez, é interligado a um hodômetro, para medir a posição longitudinal, e a um computador de bordo com programas de coleta.

Um destes equipamentos, se trata do Perfilômetro Laser do TRRL, desenvolvido nos anos 1970, é equipado com quatro medidores laser, adaptados em sequência, que medem as distâncias para a superfície do pavimento, onde o cálculo do perfil do pavimento é feito a partir do processamento dos dados. Outros conhecidos são o *Automatic Road Analyser* (ARAN), analisador automático do pavimento que mede afundamento de trilha de roda, perfil transversal e irregularidade; e o DYNATEST MARK II RSP. Este último é capaz de determinar diferentes parâmetros de irregularidade, características geométricas, entre outros (BENEVIDES, 2006). A Figura 10 apresenta alguns dos sistemas de medida com sonda sem contato mencionados.

Figura 10 – Perfilômetro inercial a laser (esquerda) e o ARAN (direita)



Fonte: (esquerda) Pinto (2018) e (direita) Nikolaides (2015).

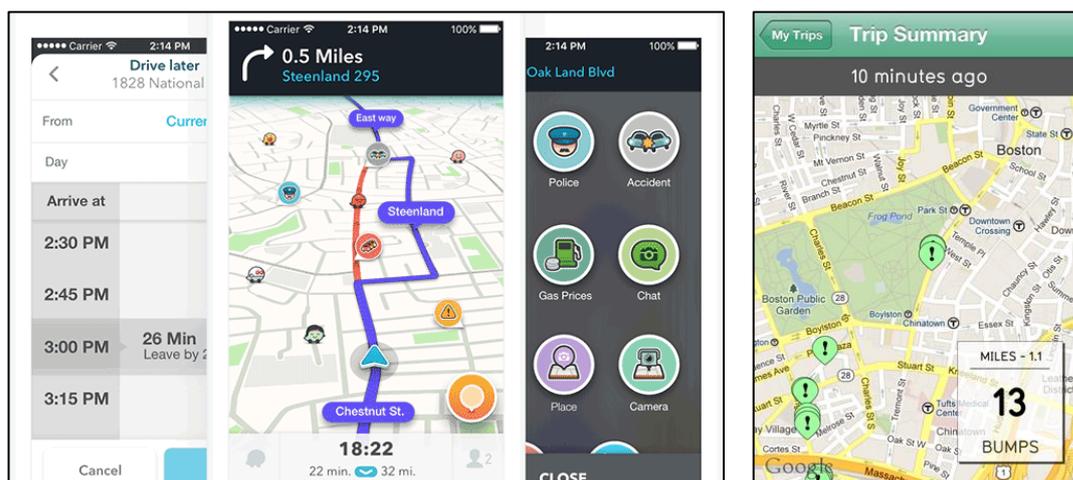
## 2.4 Smartphones e sensores móveis na avaliação da condição do pavimento

Com o rápido desenvolvimento da tecnologia de sensores móveis, o custo de acelerômetros e outros sensores de medição, como o GPS, estão ficando cada vez mais baixos. Esses sensores, assim como outros, têm se tornado portáteis e foram integrados à maioria dos *smartphones* existentes. Essa nova classe de aparelhos móveis, devido a suas diversas

funcionalidades, tornou-se bastante presente em nosso cotidiano.

Toda essa tecnologia embutida nesses aparelhos possibilitou sua aplicação em vários campos de estudo. Mais especificamente na área de transportes, aplicativos que fornecem informações a respeito das condições da via foram desenvolvidos, como o *Waze*, um dos aplicativos mais populares de trânsito e navegação no mundo, e o *StreetBump*, empregado no mapeamento de buracos e outras deformações nas ruas de Boston, capital de Massachusetts (Figura 11). Neste último, os dados coletados pelo acelerômetro e o GPS do aparelho são encaminhados a um servidor administrado pelo departamento de obras públicas de Boston (BISCONSINI, 2016).

Figura 11 – Interface dos aplicativos *Waze* (esquerda) e *StreetBump* (direita)



Fonte: (esquerda) Google Play (2019) e (direita) About Street Bump (2019).

A maioria desses estudos concentra-se principalmente na identificação e localização de anomalias simples (ou classes de anomalias). Contudo, projetos de pesquisa mais recentes (HANSON e CAMERON, 2012; FORSLOF, 2013; DOUANGPHACHANH e ONEYAMA, 2014; ALESSANDRONI *et al.* (2014), BUTLAR e ISLAM, 2014; HANSON *et al.* 2014) têm buscado empregar os dados de acelerômetros medidos através de *smartphones* ou outros dispositivos móveis para estimar índices de irregularidade, caracterizando a condição da superfície do pavimento, devido a seu baixo custo, fácil operação e alta produtividade (BISCONSINI, 2016).

A aplicação de *smartphones* na avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos pode ser classificada como um sistema de medição do tipo-resposta. Apesar de não funcionar da mesma maneira que um equipamento convencional da classe, acumulando

deslocamentos entre a carroceria e o eixo traseiro do veículo em um único sentido, os *smartphones* também não medem diretamente o perfil do pavimento como um perfilômetro, mas acelerações verticais com um aparelho fixado no interior do veículo.

Os sinais captados têm correlação com o IRI, e este último é altamente relacionado à avaliação funcional dos pavimentos. Assim como citado por Sayers e Karamihas (1998), a obtenção de sinais de aceleração com conteúdo de frequência similar às acelerações do chassi de um veículo tem alta relação com as vibrações sentidas na condução do mesmo (BISCONSINI, 2016).

Da mesma forma como os equipamentos do tipo-resposta, esses sinais são bastante sensíveis à velocidade com que o veículo se desloca. Por esse motivo, necessitam de uma calibração, conhecida como calibração por correlação, com o objetivo de determinar, para diferentes velocidades operacionais, a relação entre o valor do índice de irregularidade de referência e a quantidade de deslocamentos verticais por deslocamentos horizontais (distância percorrida) medidos pelo equipamento (BISCONSINI, 2016).

Desta maneira, entende-se que essa forma de interpretação não produz um perfil verdadeiro da superfície do pavimento, mas sim, um “perfil percebido”, uma vez que as vibrações variam de acordo com os efeitos dinâmicos decorrentes do sistema de suspensão do automóvel. Alguns estudos desenvolvidos, como o de Buttlar e Islam (2014), já buscam incorporar esses fatores na avaliação da irregularidade com *smartphones* (BISCONSINI, 2016).

Conforme já mencionado, a avaliação da irregularidade por *smartphones* se baseia na utilização do sensor de movimento, acelerômetro, e um GPS, já presentes no aparelho. Bisconsini (2016) afirma que, a avaliação pode ser abordada de duas maneiras distintas: utilizando os dados brutos (acelerações) ou os transformando em deslocamentos após o tratamento de sinais, onde esses deslocamentos são utilizados para o cálculo dos índices de irregularidade como o IRI.

Pesquisas como a de Almeida (2018), por exemplo, têm encontrado resultados satisfatórios quanto à aplicação dos *smartphones*. Nesta última, foi realizada uma correlação dos valores de IRI obtidos pelo aplicativo desenvolvido pelo autor, SmartIRI, com os valores de Valor de Serventia Atual (VSA), por análise subjetiva da condição do pavimento, sendo encontrado um valor de correlação média ( $R^2$ ) de 0,76. Esses resultados, mostram que estes aparelhos móveis têm potencial para gerar informações importantes sobre a irregularidade, com nível de qualidade aceitável para um Sistema de Gestão de Pavimentos (SGP).

De maneira geral, um sistema de gerência de pavimentos tem como componentes o

planejamento, o projeto, a construção e a manutenção dos pavimentos. Ao se tratar da gerência em nível de rede, os trechos prioritários da malha rodoviária são indicados, sendo submetidos a investimentos de manutenção, de forma que os recursos destinados tenham o melhor retorno econômico possível. Uma vez que a área ou malha rodoviária de estudo costuma ser extensa, na coleta e análise de dados, predomina-se a quantidade sobre o detalhe, isto é, busca-se o conhecimento da malha como um todo, de forma a possibilitar a adequada priorização dos recursos disponíveis, conforme citado no Manual de Gerência de Pavimentos do DNIT (2011).

Neste sentido, os diferentes instrumentos de medição da irregularidade de pavimentos devem ser adequados para o tipo de informação requerida, além do tempo e recursos disponíveis. Bisconsini (2016) e Haas *et al.* (1994) explicam que, devido a maneira como as informações em um nível de rede são tratadas, essas não precisam ser de alta precisão. Os autores explicam que os levantamentos da malha rodoviária são usados para a avaliação das necessidades globais e para programação dos investimentos de manutenção. Assim, o baixo custo e alta velocidade dos sistemas medidores tipo-resposta permite que estes sejam adequados para este fim.

Forslof (2013) ressalta que os *smartphones* podem fornecer constantes atualizações sobre a condição do pavimento a uma página da web em um curto período, comparado a outros métodos que encontram dados “exatos”, mas que, devido a custos ou velocidade, acabam não sendo utilizados com frequência. Assim, como citado no Manual de Gerência de Pavimentos (2011), no SGP em nível de rede, os dados adquiridos devem ser mais simples e demandar um menor intervalo de tempo para a sua aquisição. A preocupação é a escolha da melhor estratégia (“o que fazer”), que indique a ação mais apropriada (“como fazer”), escolhendo os trechos prioritários (“onde fazer”), definindo o melhor período para os serviços de manutenção e/ou restauração (M&R) e a que custo aproximado (“quando fazer”).

Bisconsini (2016) afirma que um intervalo grande na coleta de dados dificulta a identificação de defeitos, que podem evoluir rapidamente em função da própria irregularidade longitudinal dos pavimentos. O autor ressalta que uma realimentação constante do índice de irregularidade em um sistema de gerência de pavimentos permite a previsão dos prejuízos causados aos usuários, especialmente em termos de custos operacionais dos veículos, sendo mais uma razão na tomada de decisão de uma malha rodoviária, isto é, na escolha da estratégia mais adequada.

A avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos se torna ainda mais importante em países em desenvolvimento, onde o orçamento e a infraestrutura costumam ser

limitados. O alto custo necessário para a aplicação de equipamentos mais modernos dificulta sua utilização de forma frequente por parte de órgãos rodoviários. Assim, o emprego de *smartphones* na coleta de dados de irregularidade poderia ser de grande ajuda para agências de orçamento limitado (DOUANGPHACHANH e ONEYAMA, 2013).

Segundo Bisconsini (2016) o emprego de *smartphones* também pode ser usado na avaliação de estradas não pavimentadas, para as quais é recomendado a utilização de medidores do tipo-resposta. As informações podem ser utilizadas como critério na tomada de decisão e estratégias para conservação desse tipo de via, bastante comum em países em desenvolvimento. De acordo com a pesquisa de rodovias (2019), realizada pela Confederação Nacional do Transporte (CNT), no Brasil, 78,5% da malha rodoviária é constituída de rodovias não pavimentadas, o que motiva ainda mais o uso de *smartphones* na avaliação do pavimento.

O número de usuários desses dispositivos apenas cresce, em todo o planeta, 5,1 bilhões de pessoas usam algum tipo de aparelho de telefone celular, segundo o relatório Economia Móvel 2019, da GSMA, empresa que representa o interesse de operadoras e avalia o ecossistema móvel. O número equivale a 67% da população mundial. Em 2019, apenas no Brasil, cerca de 204 milhões de *smartphones* estavam em funcionamento, quase a totalidade dos 210 milhões de brasileiros. Bisconsini (2016) e Douangphachanh e Oneyama (2013) afirmam que a grande quantidade de usuários aumenta ainda mais o potencial de coleta com baixos investimentos. Essa abordagem pode ser positiva não apenas na análise da irregularidade longitudinal, mas também para a infraestrutura rodoviária como um todo.

Em suma, a evolução e expansão da tecnologia móvel no mercado, além de sua aplicação recente já em alguns aspectos no campo da infraestrutura de transportes e outras áreas, representam uma oportunidade atraente para a coleta de dados de irregularidade dos pavimentos a partir de *smartphones*. Apesar de ainda haver certo ceticismo no uso desses aparelhos na avaliação do pavimento, a aplicação dos mesmos para este fim pode contar com grande crescimento em um mercado em expansão. Assim como citado no Manual de Gerência dos pavimentos (2011), em um SGP busca-se cada vez mais desenvolver e utilizar equipamentos automatizados para esta tarefa, com rápida aquisição de dados, mínima interferência no tráfego, processamento de dados mais eficiente e que produzam informações essenciais simples e globais da malha viária.

## 2.5 Escalas de medição da irregularidade longitudinal

A irregularidade pode ser medida em diferentes escalas, que dependem essencialmente do equipamento utilizado para a avaliação da superfície do pavimento. Caso o equipamento mensure o perfil longitudinal, então os dados obtidos precisam ser reduzidos a um sumário estatístico. Se, por outro lado, mede a resposta do automóvel à irregularidade longitudinal do pavimento, se faz necessário correlacionar as medidas obtidas a uma escala comum, para que assim possam vir a ser comparadas às medidas realizadas por outros equipamentos, promovendo uma consistente e estável medida de irregularidade. (SONCIM, 2011).

Segundo Haas, Hudson e Zaniewski (1994), dois dos sumários estatísticos de uso mais comuns na avaliação da irregularidade são:

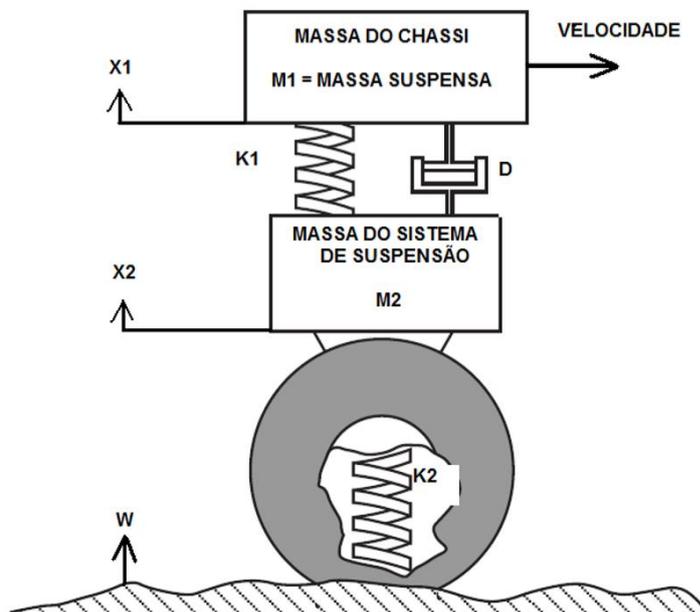
- Modelo de simulação Quarto-de-Carro – esse modelo se baseia na simulação de forma simplificada de um veículo, formado pela massa do chassi, um amortecedor, uma mola e uma roda (Figura 12). Tal modelo pode ser descrito através de duas equações diferenciais de segunda ordem (Equações 1 e 2), assim como exposto por Queiroz (1984) e a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) 1170:

$$-K_1(X_1 - X_2) - D(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) = M_1\ddot{X}_1 \quad (1)$$

$$K_1(X_1 - X_2) + D(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) - K_2(X_2 - W) = M_2\ddot{X}_2 \quad (2)$$

Em que:  $K_1$ ,  $K_2$  e  $D$ : constantes;  
 $X_1$ : ordenada da massa suspensa;  
 $X_2$ : ordenada da massa não suspensa;  
 $W$ : ordenada do perfil.

Figura 12 – Esquema do simulador Quarto-de-Carro



Fonte: Soncim (2011).

Dado que o equipamento do tipo-resposta mede o deslocamento entre o chassi e o eixo do veículo, é necessário que seja calculado a diferença das elevações entre o chassi e o eixo em resposta ao perfil do pavimento, no sentido do trajeto do veículo. Esse cálculo é feito através da integração das diferenças de velocidades entre as massas suspensas e não suspensas, produzindo a estatística Quarto-de-Carro (QC) (Equação 3) (SONCIM, 2011).

$$QC = \frac{1}{L} \int_0^{L/V} |\dot{X}_1 - \dot{X}_2| dt \quad (3)$$

Em que:  $L$ : comprimento do percurso;  
 $V$ : velocidade de avanço.

Segundo Soncim (2011), há dois grupos de constantes físicas utilizadas na determinação da estatística Quarto-de-Carro. O primeiro grupo consiste dos parâmetros originais do BPR, enquanto que o outro é composto por parâmetros desenvolvidos na pesquisa do *Highway Safety Research Institute* (HSRI), os valores de ambos são apresentados na Tabela 2. A estatística Quarto-de-Carro é definida como Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI) quando são utilizados os parâmetros do HSRI, o que foi estabelecido pelo Banco Mundial em 1982, estes parâmetros também são definidos como o conjunto de dados *Golden Car*.

Na determinação do IRI também é realizado uma média móvel de cada elevação do perfil longitudinal antes da simulação Quarto-de-Carro, isto é realizado por duas razões: para simular o comportamento de pneus em rodovias e para diminuir a sensibilidade da variação dos valores de IRI ao longo do perfil.

Tabela 2 – Constantes físicas do modelo de simulação do Quarto-de-Carro

<i>Tipo de veículo (seg<sup>-2</sup>)</i>	<i>K<sub>1</sub> (seg<sup>-2</sup>)</i>	<i>K<sub>2</sub> (seg<sup>-2</sup>)</i>	<i>M</i>	<i>D (seg<sup>-1</sup>)</i>
BPR	129	643	0,16	3,9
HSRI	63,3	653	0,15	6

Fonte: Adaptado de Soncim (2011).

- Aceleração Vertical Média Quadrática (AVMQ) – a aceleração vertical média quadrática se trata de uma estatística de perfil longitudinal simples e que pode ser entendida matematicamente como a diferença média quadrática entre a variação de elevação e o intervalo de distância horizontal correspondente, essa distância é denominada comprimento de base. A AVMQ pode ser determinada para diferentes comprimentos de base (SONCIM, 2011).

Gillespie, Sayers e Segel (1980 apud SONCIM, 2011) elaboraram uma metodologia de calibração em que o parâmetro de irregularidade é embasado na simulação de um Quarto-de-Carro para um perfil longitudinal medido por um perfilômetro. De maneira semelhante Queiroz (1981) desenvolveu um procedimento a partir de perfis medidos com nível e mira, para calibração de equipamentos do tipo-resposta, em que o índice utilizado é o Quociente de Irregularidade (QI), dado em contagens/km. Tal parâmetro se encontra normatizado na DNER-ES 173/86.

O Quociente de Irregularidade é calculado através da Raiz de Aceleração Vertical Média Quadrática (VA) definida a partir de cotas verticais  $y_1, y_2, \dots, y_n$  de pontos de um perfil longitudinal, espaçados igualmente, de acordo com a Equação 4. A equação de Cezar Queiroz (Equação 5) utiliza VA's com comprimentos de base de 1,0 e 2,5 metros e, da mesma maneira que o IRI quantifica a irregularidade do pavimento, sendo bastante utilizada nacionalmente na avaliação de rodovias. A Figura 13 mostra uma representação esquemática do cálculo da VA.

$$VA_B = \left[ \sum_{i=k+1}^{n-k} \frac{SB_i^2}{n-2k} \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$QI = -8,54 + 6,17.VA_{1,0} + 19,38.VA_{2,5} \quad (5)$$

Em que:  $VA_B$ : raiz da aceleração vertical média quadrática, correspondente ao comprimento de base  $B$ ;

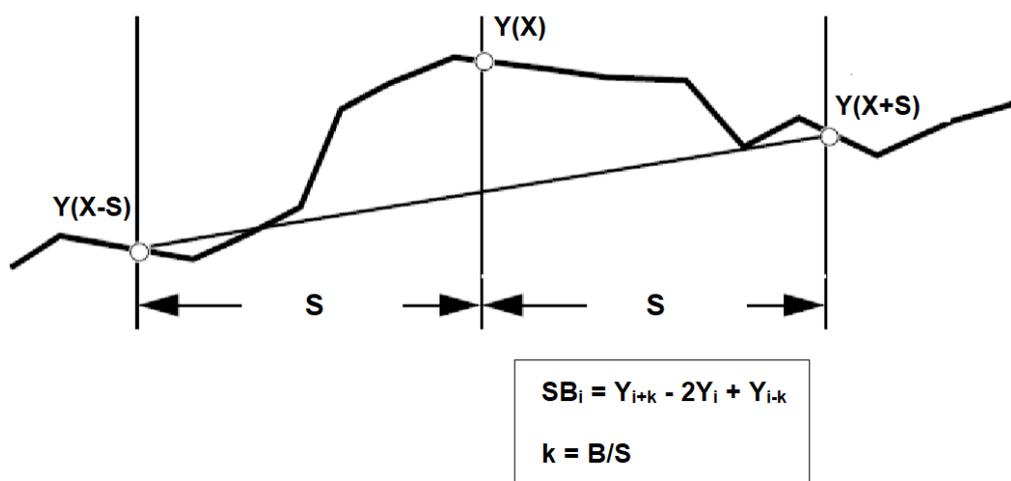
$B$ : comprimento de base em metros;

$n$ : número de cotas levantadas;

$SB_i$ : uma estimativa da derivada segunda de  $y$  no ponto  $i$  (aceleração vertical);

$k$ : razão do comprimento de base e da distância entre cotas.

Figura 13 – Esquema de determinação da Raiz da Aceleração Vertical Média Quadrática



Fonte: Adaptado Soncim (2011).

O cálculo do QI a partir de um perfil longitudinal é relativamente simples, o que naturalmente facilitou sua disseminação e utilização no Brasil – especialmente para o cálculo do QI em medidores do tipo-reposta. Além disso, a norma DNER-ES 173/86 que regulamenta a determinação deste parâmetro também é bastante didática apresentando inclusive um exemplo de cálculo. O mesmo não é verdade para a determinação do IRI, que além de complexo se mostra bastante trabalhoso. As duas normas americanas ASTM E 1926-98 e ASTM E 1364-95 que tratam sobre o cálculo deste índice de irregularidade não apresentam exemplos, tampouco demonstram suas fórmulas, expondo apenas exemplos de algoritmos de cálculo para

implementação em softwares.

Barella (2008) tendo em vista que os modelos de cálculo e, conseqüentemente, de calibração de um medidor do tipo resposta em IRI, não eram muito difundidos no país, desenvolveu um modelo de correlação entre o IRI e o QI (Equação 6), visando que poderia ser de grande utilidade. Apesar de já haver modelos de correlação como o de Paterson (1986), estes foram obtidos a partir dos dados do IRRE, que não contou com um número muito grande de segmentos avaliados, e que podiam levar a variações significativas.

$$QI = 15,42 \cdot IRI - 10 \quad (6)$$

Em que: *QI*: Quociente de Irregularidade (cont/km);  
*IRI*: Índice de Irregularidade Longitudinal (m/km).

O modelo de correlação proposto por Barella (2008) contou com perfis longitudinais que totalizaram cerca de 4000 km de trilhas de roda. Dentre este rol estavam inclusas rodovias concedidas à iniciativa privada e conservadas pelo poder público e todas eram pavimentadas. Além disso, havia grande variedade da idade das mesmas, alguns trechos possuíam mais de 30 anos de construção, restaurados diversas vezes, enquanto outros possuíam menos de 6 anos, nunca antes restaurados. Todos esses aspectos contribuíram para que este modelo apresentasse uma sensível melhora na correlação entre os dois índices.

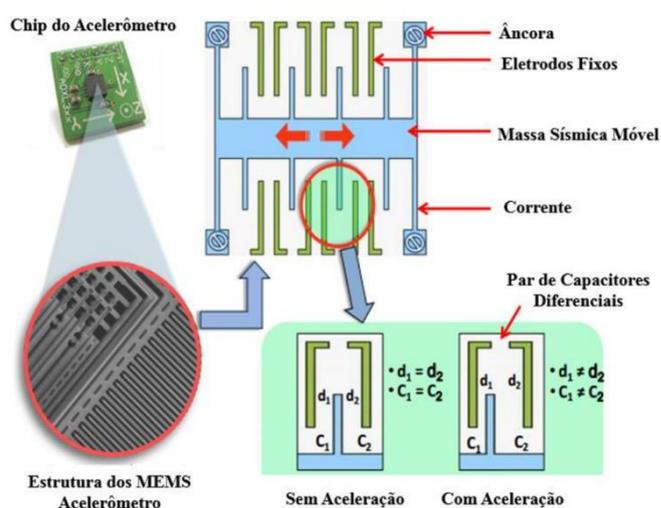
## 2.6 Processamento de dados fornecidos por *smartphones*

A análise da irregularidade longitudinal dos pavimentos através de *smartphones* leva em consideração as acelerações verticais dos automóveis em movimento. A amplitude da aceleração depende diretamente da severidade, extensão, frequência de ocorrência e tipo dos defeitos no pavimento, a existência de outras irregularidades na superfície e inclusive da suspensão e velocidade do veículo. Ao ser fixado no veículo, os sensores presentes no aparelho móvel permitem que essas vibrações possam ser captadas e medidas (BISCONSINI, 2016).

Tal avanço se tornou possível por meio desses componentes, expandindo significativamente a aplicação de *smartphones* em diversas áreas. Na avaliação da irregularidade dos pavimentos, um dos fatores que podem vir a afetar a obtenção do índice de irregularidade através de acelerações verticais é a aceleração na velocidade do veículo. A

frequência dos desvios verticais muda para diferentes velocidades, o mesmo pode ser dito para os valores de pico das acelerações. A diferença entre essa variação de frequência e os picos de aceleração devem ser compensados para que uma estimativa significativa de irregularidade possa ser fornecida para uma ampla faixa de velocidades (BISCONSINI, 2016). A Figura 14 detalha os componentes de um sensor acelerômetro presente em *smartphones*.

Figura 14 – Estrutura de um acelerômetro instalado em *smartphones*



Fonte: Bisconsini (2016).

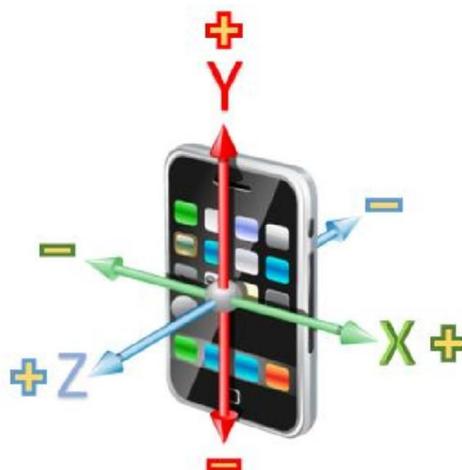
Bisconsini (2016) afirma que também há outros fatores que podem vir a alterar os sinais de aceleração, os mesmos podem estar sujeitos a “ruídos”, erros aleatórios ocasionados pelo próprio sensor ou outros dispositivos eletrônicos, que acabam por afetar o sinal de saída. Esses ruídos podem ser ocasionados, por exemplo, por movimentos ressoantes do suporte do aparelho móvel para o *smartphone*, pelo ronco do motor, curvas horizontais e verticais, em freadas ou na troca de marchas. Por essa razão, as condições adotadas para aquisição de dados, como o trecho escolhido e o veículo utilizado, devem ser adequados para que estes erros possam ser minimizados.

Um importante cuidado que deve ser ponderado antes da coleta dos dados, se trata da fixação do aparelho, uma vez que o mesmo pode estar suscetível a vibrações que não são decorrentes diretamente da irregularidade do pavimento, mas devidas as “flutuações”, quando o *smartphone* não se encontra fixado de forma rígida. Isto é, devido a flexibilidade do suporte de plástico são geradas vibrações ressonantes, principalmente nas montagens em balanço e, desta forma, comprometer a autenticidade dos dados obtidos (BISCONSINI, 2016).

Quando se trata dos acelerômetros presentes em aparelhos móveis, a variação da

aceleração de um dispositivo é medida através de um sistema de coordenadas de três eixos. O eixo X é horizontal e aponta para a direita, considerando que a tela do aparelho esteja virada para o usuário e que não esteja de ponta-cabeça. Da mesma maneira, o eixo Y é vertical e aponta para cima, enquanto que o eixo Z é direcionado para o exterior da face frontal. Esse sistema é ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Sistema de coordenadas de um *smartphone*



Fonte: Bisconsini (2016).

No sistema *Android*, vários aplicativos permitem que os sinais transmitidos aos sensores dos *smartphones* possam ser visualizados, contudo poucos apresentam a funcionalidade de salvar esses dados. No caso desta pesquisa, o aplicativo *Androsensor* foi o escolhido, pois não apenas exibe os dados captados, como também permite que sejam gravados, além de possuir outras funcionalidades úteis como definição da taxa de aquisição e escolha das unidades dos dados.

Após as devidas providências tomadas e a coleta de dados realizada, os mesmos podem ser correlacionados com o índice de irregularidade escolhido. As acelerações verticais determinadas pelo aparelho móvel podem ser utilizadas no cálculo de medidas estatísticas de RMS – *Root Mean Square* (Raiz da Média Quadrática ou Valor Eficaz). Neste estudo, estes parâmetros serão denominados RMSVA – *Root Mean Square Vertical Acceleration* (Raiz da Média Quadrática da Aceleração Vertical). Este parâmetro pode ser calculado a partir da equação 7.

$$RMSVA = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N a_{zi}^2} \quad (7)$$

Em que:  $RMSVA$ : Raiz da Média Quadrática da Aceleração Vertical (m/s<sup>2</sup>);  
 $a_z$ : Aceleração Vertical (m/s<sup>2</sup>);  
 $n$ : número de dados.

Essa medida estatística, desenvolvida no final da década de 1970, se baseia no mesmo conceito da VA, utilizada no cálculo do QI, contudo ao contrário da VA, o RMSVA não é calculado a partir de comprimentos de base padronizados. Como o índice variava com o intervalo de amostragem, o mesmo não podia obter medidas válidas através de um perfilômetro, o que levou ao seu aprimoramento em outro método, o próprio Quociente de Irregularidade, mencionado anteriormente.

Embora não fosse utilizado diretamente como um índice na avaliação do pavimento, o RMSVA possui relação com a irregularidade do mesmo. Por essa razão, ainda hoje valores deste índice são correlacionados com índices de irregularidade de referência, mais especificamente em pesquisas sobre o uso de aparelhos móveis na análise da irregularidade. Bisconsini (2016) afirma que estudos como Zeng *et al.* (2014) compararam dados de aceleração, transformados em valores de RMSVA, com valores de IRI obtidos por um ARAN.

Bisconsini (2016) afirma que relacionar dados fornecidos por *smartphones* com a irregularidade longitudinal dos pavimentos, se resume basicamente a duas abordagens distintas. Quando o objetivo é o cálculo direto do IRI, são obtidos os deslocamentos a partir da dupla integral das acelerações, em função do tempo. Contudo, se realizada sem tratamento adequado, pode gerar erros graves originados dos “ruídos” nos sensores, levando a erros de integração significativos quando não corrigidos. Por esse motivo, são necessárias filtragens dos sinais de aceleração de modo a reduzir tais inconvenientes.

A outra abordagem na avaliação da condição da irregularidade do pavimento a partir de *smartphones*, é através da coleta dos dados de aceleração do trecho de interesse, cálculo dos valores de RMSVA a partir da subdivisão dos trechos e correlação com índices de métodos de calibragem.

## 2.7 Coeficiente de Pearson para correlação entre duas variáveis

Em termos estatísticos, a correlação pode ser entendida como um método que avalia uma possível associação linear bidirecional entre duas variáveis contínuas. Tal conceito, pode ser medido por uma estatística chamada coeficiente de correlação, que representa a força da associação linear entre as variáveis em questão. Esse coeficiente é adimensional e pode assumir um valor no intervalo de -1 a +1.

Um coeficiente de correlação de valor zero indica que não existe nenhuma relação linear entre as duas variáveis, enquanto que uma correlação de -1 ou +1, significa uma relação linear perfeita. A força da relação entre as variáveis pode ser representada por qualquer valor entre -1 e +1.

Se o coeficiente for um número positivo, as variáveis estão diretamente relacionadas (isto é, conforme o valor de uma variável aumenta, o valor da outra também tende a aumentar). Se, por outro lado, o coeficiente for um número negativo, as variáveis estão inversamente relacionadas (ou seja, conforme o valor de uma variável aumenta, o valor da outra tende a diminuir).

Um dos principais índices de correlação se trata do coeficiente de correlação de produto-momento de Pearson, sendo tal denotado pela letra “ $\rho$ ” para um parâmetro populacional e como “ $r$ ” para uma estatística de amostra. A equação (8) a seguir apresenta o cálculo desse parâmetro.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2][\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]}} \quad (8)$$

Em que:

- $r$ : Coeficiente de Pearson;
- $x_i$ : valor de x para a i-ésima amostra;
- $y_i$ : valor de y para a i-ésima amostra.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os procedimentos tomados para obtenção dos parâmetros de irregularidade longitudinal para os trechos estudados (CE-356 e CE-377). Tais se tratam da coleta dos dados por meio do equipamento de Nível e Mira, o levantamento de dados a partir de um *smartphone*, cuidados e recomendações a serem tomadas, escolha do modelo de *smartphone*, escolha do aplicativo utilizado e o processamento de seus dados.

#### 3.1 Obtenção dos índices de irregularidade de referência pelo Nível e Mira

Para determinar o potencial do uso de *smartphones* para a avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos, inicialmente foram calculados índices de irregularidade de referência, em termos de IRI. Este processo se deu através da obtenção de dados levantados pelo método do Nível e Mira, normatizado pela DNER-ES 173/86, para garantir a confiabilidade dos dados obtidos com um *smartphone*.

Neste trabalho, foram selecionados trechos de estradas de 100 metros de extensão, que não possuíssem curvas ou rampas acentuadas, para evitar a influência dessas variáveis nos resultados da pesquisa. Foram escolhidos dois segmentos, buscando contemplar níveis de irregularidade distintos: um de baixa irregularidade (IRI com cerca de 2m/km) e o outro muito irregular (IRI acima de 4m/km). Deste modo, é possível avaliar a capacidade do *smartphone* em diferentes circunstâncias, além de abranger uma maior faixa de dados. Para se definir os trechos que pudessem servir à pesquisa, foram analisados os seguintes aspectos:

- 1) A sensibilidade do motorista e passageiro com relação às vibrações do veículo;
- 2) A intensidade do trânsito de veículos, uma vez que, em questões de segurança, poderiam dificultar o levantamento pelo método do Nível e Mira ou não permitir que o veículo se mantivesse em velocidade constante durante a aquisição dos dados com o *smartphone*.
- 3) A captura de número de satélites suficiente pelo GPS do *smartphone*, para garantir a precisão das coordenadas que definem o início e o término dos trechos.

Desta forma, foram seleccionados dois trechos que se encaixassem nos requisitos acima mencionados. Para o segmento de baixa irregularidade, foi utilizado o trecho da CE-356, apresentado nas Figuras 16 e 17, localizada no município de Russas. Esta rodovia havia sido recentemente restaurada no ano de 2016, o que possibilitou a coleta de dados em uma via com boas condições de rolamento.

Figura 16 – Vista aérea do trecho CE-356



Fonte: Google Earth (2019).

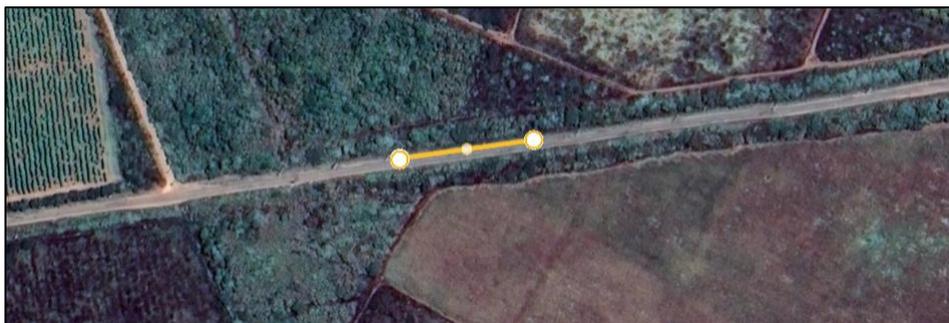
Figura 17 – Levantamento topográfico com Nível e Mira na CE-356



Fonte: Autoria própria.

Para a condição de alta irregularidade, foi escolhida a rodovia CE-377, mostrada nas Figuras 18 e 19, no município de Quixeré próximo a uma indústria de cimento. Em grande parte de sua extensão, o pavimento se encontrava em péssimas condições, uma vez que se trata de uma rota muito utilizada por veículos pesados como caminhões de plantações adjacentes, além de outras máquinas provenientes de uma mineradora que se encontra na região.

Figura 18 – Vista aérea do trecho na CE-377



Fonte: Google Earth (2019).

Figura 19 – Fotografia retirada da CE-377



Fonte: Autoria própria.

Com os dados do perfil longitudinal levantados, buscou-se determinar então os valores de IRI para cada um dos trechos. Contudo, em vez de tentar estimar esses índices de maneira direta, optou-se pela determinação através da fórmula de correlação do IRI e do QI de Barella (Equação 6), conforme explicado no Seção 2.5. O cálculo do QI para o método do Nível e Mira também se encontra normatizado na DNER-ES 173/86 e foi realizado através de planilhas eletrônicas no *Excel*, assim como a conversão de seu valor para o IRI, através da Equação 6.

Para que fosse possível a análise do grau de correlação dos dados tratados entre ambos os métodos, o Nível e Mira e o do *smartphone*, era necessário mais de um valor de IRI e AVMQ de cada trecho. Logo, os trechos de 100 metros foram divididos em cinco segmentos menores, de 20 metros cada, para os quais foram calculados o valor de QI e IRI de cada um.

## 3.2 Levantamento da irregularidade a partir de um smartphone

### 3.2.1 Avaliação e escolha do modelo de smartphone

Para a realização do levantamento através do *smartphone*, foi necessário ser utilizado um modelo de aparelho que possuísse como base de sistema o *Android*, isso se deve ao aplicativo AndroSensor, necessário para a aquisição dos dados e que se encontra disponibilizado apenas para este sistema. O modelo escolhido foi o Xiaomi Mi A1, porém, antes que pudesse ser empregado, alguns de seus atributos foram analisados. Para garantir que as coordenadas fornecidas seriam de confiabilidade, foi verificada a precisão de seu GPS comparando suas coordenadas com as do programa de geolocalização *Google Earth*, uma vez que alguns aparelhos podem não capturar satélites suficientes, ou devido ao tempo decorrido desde a sua aquisição, apresentar defeitos.

Outro sensor averiguado foi o acelerômetro, alguns modelos de *smartphone* podem apresentar uma baixa taxa de aquisição de acelerações medidas pelo aplicativo, variando com base na capacidade de processamento do aparelho. Outro aspecto quanto ao acelerômetro também foi a sua precisão, uma maneira de se verificar isso é através do próprio aplicativo AndroSensor, observando se o mesmo registra uma aceleração aproximadamente igual a  $9,8 \text{ m/s}^2$  para o eixo vertical, quando mantido em repouso e posicionado em uma superfície plana.

Como mencionado no Tópico 2.6, os aparelhos *smartphones* estão sujeitos a ruídos, logo também foi verificado a precisão das acelerações lineares apontadas pelo aplicativo, que apresentava uma precisão de até duas casas decimais, suficientes para não influenciarem de maneira tão drástica os dados obtidos. Como o modelo analisado, apresentava uma boa precisão dos aspectos citados e uma boa taxa de aquisição de dados, o mesmo foi escolhido para a realização deste estudo.

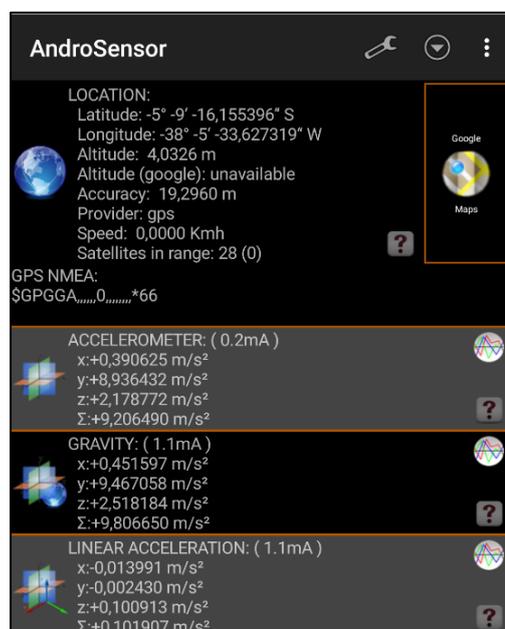
### 3.2.2. Aplicativo empregado para a coleta de dados

Conforme citado previamente, o aplicativo utilizado para a coleta de dados através do *smartphone* foi o AndroSensor representado na Figura 20, que não apenas exhibe simultaneamente dados adquiridos pelos vários sensores presentes no aparelho, como também permite gravá-los, além de permitir escolher quais desses permanecem atuando na obtenção de dados.

A taxa de atualização dos dados e a frequência de gravação também podem ser pré-definidos, para os quais foram estabelecidos como “normal” e o menor intervalo de gravação, para maior aquisição de dados, respectivamente. Os dados do aplicativo necessários para a realização dessa pesquisa, foram as coordenadas e a velocidade de deslocamento do GPS, necessárias para identificar os dados que pertencem ao intervalo dos trechos, definidos pelas coordenadas dos pontos inicial e final. Os dados utilizados para o cálculo do AVMQ são as acelerações lineares que se encontra perpendicular ao eixo longitudinal do veículo durante a coleta, neste caso o eixo Y do aparelho.

Outro ponto importante a se destacar a respeito do AndroSensor se trata do ponto em que se deve iniciar a gravação dos dados. Deve-se partir de um ponto conhecido antes do início do trecho, para que seja atingida a velocidade de interesse (60 km/h), a mesma adotada em estudos semelhantes como Bisconsini (2016) e Almeida (2018), antes do ponto inicial medido pelo método do Nível e Mira, o que também garante a coleta de dados imediatamente ao mesmo. O mesmo raciocínio é válido para o ponto final, onde a gravação deve ser interrompida somente após o mesmo.

Figura 20 – Detalhe do painel do aplicativo AndroSensor



Fonte: Autoria própria.

### 3.2.3 Escolha do suporte do aparelho smartphone, veículo utilizado e coleta de dados

Um aspecto importante que deve ser atentado antes da coleta de dados, no que diz

respeito ao equipamento utilizado, é a escolha do suporte veicular para *smartphones* adequado. No caso deste estudo, foram realizados testes prévios com o objetivo de avaliar os modelos encontrados no mercado. Através deles percebeu-se que boa parte dos modelos de suporte escolhidos permitiam a “flutuação” do aparelho móvel, como o mostrado na Figura 21, independente do cuidado na fixação do mesmo, que podia ser proveniente de seu material flexível ou de sua forma que facilitava a vibração excessiva dos *smartphones*, levando a perda de confiabilidade dos dados.

Devido a esse problema, optou-se pela escolha de um suporte que possuísse o menor comprimento possível de eixo, do ponto de fixação até o ponto de apoio do *smartphone*. O apoio que apresentava essa característica e escolhido pelo autor, foi um suporte magnético que pode ser fixado na saída de ar-condicionado do veículo (Figura 22). Esse equipamento forneceu bom apoio e permitiu o posicionamento adequado do aparelho móvel em relação aos eixos de coordenadas do mesmo, isto é, alinhado verticalmente ao eixo Y de seu acelerômetro.

Figura 21 – Suporte veicular para smartphone fixado em para-brisa



Fonte: Autoria própria

Figura 22 – Suporte veicular para smartphone adotado fixado em saída de ar



Fonte: A autoria própria

Quanto ao veículo utilizado para o processamento de dados foi um Fiat, modelo Grand Siena, de motor 1.6, ano 2013. Ao contrário de outros estudos semelhantes, como o de Almeida (2018), não foram realizadas inspeções na suspensão do veículo que, segundo o autor, têm como função minimizar erros a partir desse sistema. Contudo, o automóvel no período da coleta de dados havia sido adquirido há pouco tempo, o que levou o autor deste estudo a acreditar que problemas oriundos do mesmo, que viessem a impactar os dados, eram desprezíveis.

A coleta também foi realizada com dois passageiros presentes, e da mesma maneira que Bisconsini (2016), a influência dessa variável sobre os resultados obtidos não foi avaliada neste estudo.

Figura 23 – Veículo utilizado na coleta de dados



Fonte: Autoria própria.

Como também recomendado por Gillespie *et al.* (1986 apud BISCONSINI, 2016), foram feitas a aquisição de dados em mais de uma viagem sobre cada trecho das rodovias. Segundo os autores a utilização de dados coletados repetidas vezes de um mesmo segmento, isto é, os valores de acelerações verticais coletados em diferentes viagens para um mesmo trecho, contribui para a eliminação de erros gerados nas manobras do condutor, variações na resposta do veículo e outros fatores relacionados aos medidores tipo-resposta. Para esta pesquisa foram feitas 3 viagens sobre cada trecho, todas válidas para o cenário de coleta.

#### **3.2.4 Processamento dos dados**

Os dados coletados através do *smartphone* são fornecidos pelo aplicativo AndroSensor em formato CSV, o qual através de outro aplicativo, o *CSV File Converter*, foi transformado para o formato *xlsx*, suportado pelo programa *Excel*. O processamento dos dados se deu através deste programa, que exibiu apenas as informações determinadas no aplicativo, no caso deste estudo: a aceleração linear no eixo Y (em  $m/s^2$ ), as coordenadas de latitude e longitude do GPS (em graus, minutos e segundos), e a velocidade de locomoção (em km/h), conforme apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Resultado do arquivo de medição pelo AndroSensor.

LINEAR ACCELERATION Y (m/s <sup>2</sup> )	LOCATION Latitude :	LOCATION Longitude :	LOCATION Speed ( Kmh)
0.524525	-5° -4' -51,827774" S	-37° -50' -18,246460" W	60.624
0.111846	-5° -4' -51,827774" S	-37° -50' -18,246460" W	60.624
-0.133408	-5° -4' -51,862106" S	-37° -50' -18,768311" W	60.876
-0.583543	-5° -4' -51,862106" S	-37° -50' -18,768311" W	60.876
-0.341849	-5° -4' -51,980553" S	-37° -50' -19,496155" W	62.1
-0.068835	-5° -4' -51,980553" S	-37° -50' -19,496155" W	62.1
-0.080343	-5° -4' -52,184830" S	-37° -50' -20,429993" W	64.656
-0.542623	-5° -4' -52,184830" S	-37° -50' -20,429993" W	64.656
0.020513	-5° -4' -52,366791" S	-37° -50' -21,418762" W	66.96

Fonte: Aatoria própria

Com os dados levantados e as coordenadas dos pontos inicial e final do levantamento pelo método do Nível e Mira, foi determinado um intervalo de dados de aceleração vertical que compreendesse o trecho de 100 metros levantado pelo método de calibração. O propósito desse processo era garantir que os pontos de início e término dos trechos de ambos os métodos seriam iguais, os mesmos, para tornar possível a correlação dos resultados oriundos de um mesmo trecho.

Essa abordagem foi feita utilizando a Calculadora Geográfica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), disponibilizada na internet e que permitia a conversão das coordenadas para UTM – Universal Transversa de Mercator e visualização da localização das mesmas no *Google Earth*, facilitando a compatibilização dos trechos.

Figura 25 – Calculadora Geográfica do INPE

The image displays two side-by-side screenshots of the INPE Geographical Calculator web interface. The left screenshot is titled 'Converte Coordenadas' (Convert Coordinates) and includes a dropdown menu for 'Sua coordenada esta em:' set to 'GEOGRAFICA (Grau Minuto Segundo)'. It has input fields for 'Entre Longitude ou X' (Oeste) and 'Entre Latitude ou Y' (Sul), a 'Selecione o Datum de entrada' dropdown set to 'SAD 69', and an 'Avançar' button. The right screenshot is titled 'Calcula distancia entre 2 pontos' (Calculate distance between 2 points) and has input fields for 'Entre Longitude Inicial' (Oeste), 'Entre Latitude Inicial' (Sul), 'Entre Longitude Final' (Oeste), and 'Entre Latitude Final' (Sul). It also has a 'Selecione o Datum' dropdown set to 'SAD 69' and a 'Calcular' button.

Fonte: INPE (2020)

Como é possível observar na Figura 25, essa ferramenta do INPE também permite determinar distâncias entre duas coordenadas, que foi utilizada para segmentar os trechos de 100 metros em cinco segmentos de 20 metros, da mesma maneira do método do Nível e Mira, cada um com seus dados de acelerações verticais. A partir da organização dos dados fornecidos pelo AndroSensor em planilhas eletrônicas, passou-se para o cálculo dos valores de RMSVA

de cada segmento conforme a Equação 7.

É importante ressaltar que o processo descrito até este ponto do Tópico foi repetido para os dados coletados de cada viagem, ou seja, os valores de RMSVA foram determinados para os dados das três viagens realizadas. Por fim foi aferida a média dos valores de RMSVA de cada viagem, para os segmentos de 20 metros, sendo confrontados com os valores de IRI calculados a partir dos dados levantados pelo método do Nível e Mira. Essa etapa foi feita por meio de gráficos de dispersão entre os valores de RMSVA e IRI obtidos. As curvas e seus índices de correlação desempenham o papel de avaliar quão próxima é a ligação os dados fornecidos pelo *smartphone* e a irregularidade longitudinal dos pavimentos.

### 3.3 Resumo do método

As etapas cumpridas ao longo desta pesquisa foram as seguintes:

- a) Levantamento dos dados de irregularidade através do método de Nível e Mira para trechos de 100 metros dos pavimentos de baixa e alta irregularidade, CE-356 e CE-377, respectivamente;
- b) Obtenção dos dados de aceleração vertical através de um *smartphone*, pelo aplicativo *AndroSensor*, fixado em um veículo a uma velocidade de 60 km/h para os mesmos trechos do método do Nível e Mira;
- c) Disposição dos dados do método do Nível e Mira em planilhas eletrônicas, determinação dos resultados de QI através da norma DNER-ES 173-86 e conversão dos mesmos em IRI para cada segmento de 20 metros, através da Equação de Barella;
- d) Organização dos dados de aceleração vertical do pavimento, obtidos através do *smartphone* Xiaomi Mi A1, em planilhas eletrônicas, calculando os valores de RMSVA para os mesmos segmentos de 20 metros do método do Nível e Mira;
- e) Determinação do RMSVA com uma média de 3 viagens em cada trecho;
- f) Avaliação da qualidade dos dados de IRI determinados, dos sinais de aceleração e da variabilidade dos valores de RMSVA obtidos.
- g) Correlação das amostras de RMSVA com IRI, através da análise estatística por meio da determinação do coeficiente de correlação de Pearson (R), avaliando o nível de relação dos resultados encontrados através do *smartphone* com os do método de calibragem do Nível e Mira.

## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Resultados obtidos em campo através do Nível e Mira

Os perfis de pavimento utilizados como referência nesse estudo foram trechos de 100 metros das rodovias CE-377 e a CE-356. Nesse primeiro trecho experimental, observou-se a presença de defeitos como panelas, além de muitos remendos em função do tráfego pesado de caminhões de indústrias na região.

Assim como esperado a partir de uma simples avaliação visual, a presença dessas patologias no pavimento contribuiu para maiores valores de IRI no mesmo, conforme a classificação mostrada na Figura 2. Tais índices de irregularidade longitudinal também foram semelhantes para diferentes equações de conversão de QI para IRI. Os resultados encontrados para a CE-377 são apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Índices de Irregularidade Longitudinal do trecho da CE-377 (Equação de Barella 2008)

<b>IRI determinado para segmentos de 20m</b>	
<b>Segmento (m)</b>	<b>IRI (m/km)</b>
0 - 20	4,086
20 - 40	8,690
40 - 60	5,837
60 - 80	5,383
80 - 100	6,420

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 – Índices de Irregularidade Longitudinal do trecho da CE-377 (Equação de Patterson 1986)

<b>IRI determinado para segmentos de 20m</b>	
<b>Segmento (m)</b>	<b>IRI (m/km)</b>
0 - 20	4,500
20 - 40	9,571
40 - 60	6,429
60 - 80	5,929
80 - 100	7,071

Fonte: Autoria própria.

Com relação ao trecho da CE-356, os resultados também foram satisfatórios quanto a precisão da análise através do método do Nível e Mira. Esse trecho teve valores de IRI menores quando comparados ao da CE-377, o que era esperado, uma vez que a rodovia havia

passado por um processo de restauração, conforme mencionado em 3.1. Além disso, em contrapartida a CE-377, no segmento da CE-356, atuam principalmente veículos de menor porte. As Tabelas 5 e 6 mostram os valores de IRI determinados para a CE-356.

Tabela 5 – Índices de Irregularidade Longitudinal do trecho da CE-356 (Equação de Barella 2008)

<b>IRI determinado para segmentos de 20m</b>	
<b>Segmento (m)</b>	<b>IRI (m/km)</b>
0 - 20	2,529
20 - 40	1,751
40 - 60	2,010
60 - 80	2,853
80 – 100	2,205

Fonte: A autoria própria.

Tabela 6 – Índices de Irregularidade Longitudinal do trecho da CE-356 (Equação de Patterson 1986)

<b>IRI determinado para segmentos de 20m</b>	
<b>Segmento (m)</b>	<b>IRI (m/km)</b>
0 - 20	2,786
20 - 40	1,929
40 - 60	2,214
60 - 80	3,143
80 – 100	2,429

Fonte: A autoria própria.

A classificação do pavimento quanto aos níveis de irregularidade em IRI também foram condizentes. Ao se comparar os valores obtidos em ambas as rodovias com as faixas de irregularidade apresentada na Figura 2, é possível afirmar que enquanto a rodovia CE-356 se encontra na faixa de pavimentos novos, a CE-377, um pavimento bastante desgastado através da análise visual, se encontra na faixa de pavimentos antigos.

Uma vez que a classificação e os limites de aceitabilidade do pavimento variam de um país para o outro, uma verificação mais precisa para os casos do presente estudo é através da Tabela 7 do Manual de Restauração de Pavimentos (2006), que classifica a qualidade de trafegabilidade do pavimento com o nível do IRI do mesmo.

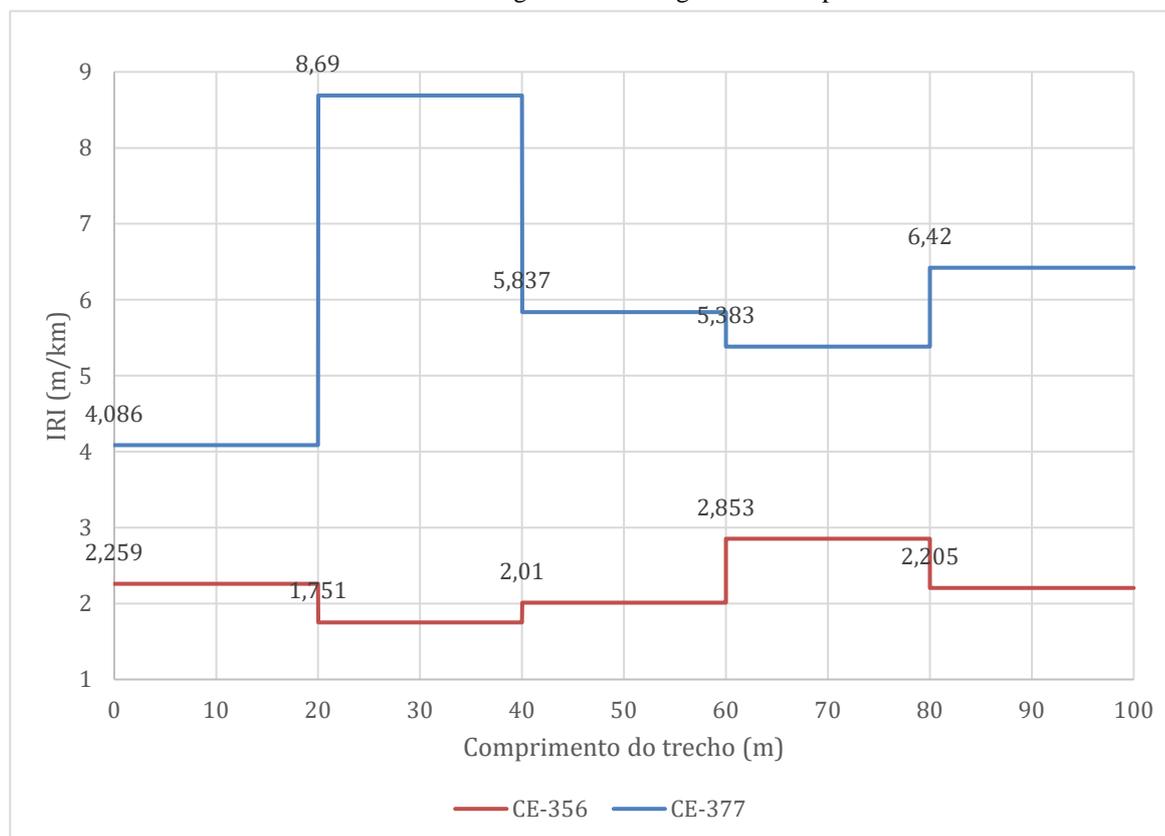
Tabela 7 – Relação entre nível de trafegabilidade do pavimento e o IRI

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

Fonte: DNIT – Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (2006).

Através da classificação do DNIT na tabela acima, nota-se que a maior parte do trecho da CE-356 possui nível de trafegabilidade “bom”, enquanto que o segmento da CE-377 se encontra no nível “péssimo”. Da mesma forma que na primeira análise desses valores, essas classificações correspondem de maneira satisfatória a qualidade do pavimento observada durante a realização do levantamento (Figuras 26 e 27). Os resultados de IRI dos dois perfis podem ser observados, com a subdivisão dos trechos em seções de 20 metros, no Gráfico 1 abaixo.

Gráfico 1 – Índice de Irregularidade Longitudinal dos perfis de estudo



Fonte: Autoria própria.

Figura 26 – Rodovia CE-377



Fonte: Google Maps (2020).

Figura 27 – Rodovia CE-356



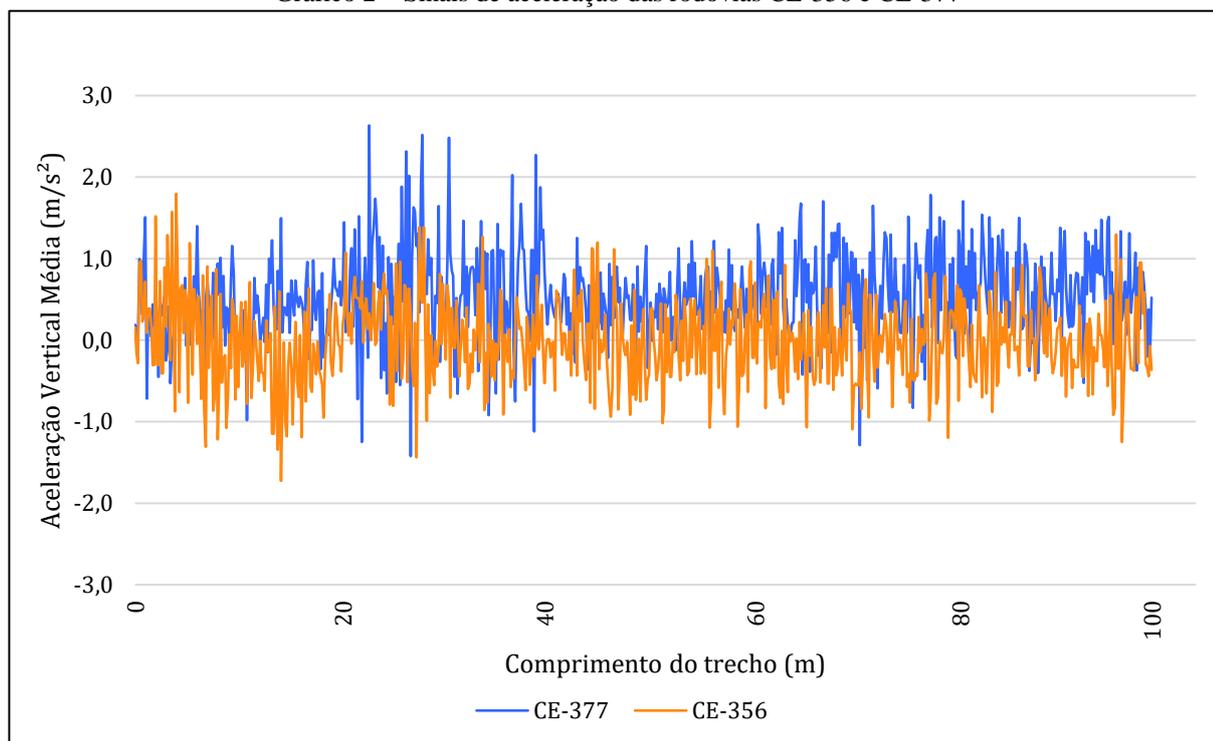
Fonte: Google Earth (2020).

#### 4.2 Resultados dos dados determinados através de um *smartphone*

A partir dos dados de aceleração vertical coletados pelo *smartphone* nas duas rodovias, apresentados no Gráfico 2, também é possível realizar uma análise do nível de irregularidade existente nas mesmas. Ao se comparar os valores de aceleração vertical de cada trecho, observa-se que, assim como esperado, a rodovia CE-377 possui na maior parte de seu trecho valores maiores do que aqueles observados na CE-356.

Assim como mencionado no Tópico 3.2.3, essas acelerações verticais foram determinadas por três passagens sobre cada trecho, os valores do gráfico abaixo mostram as médias dessas acelerações para cada rodovia.

Gráfico 2 – Sinais de aceleração das rodovias CE-356 e CE-377



Fonte: Autoria própria.

Ao se analisar os valores de RMSVA gerados a partir de tais sinais de aceleração de maneira individual, isto é, para cada passagem, também é possível verificar a variabilidade desses dados. Essa inspeção permite que seja determinado o nível de confiabilidade dos sinais de aceleração vertical obtidos para um pavimento. Embora possam vir a ter valores semelhantes em diferentes passagens, variações muito altas nos valores de RMSVA encontrados poderiam significar também níveis de IRI não precisos, ou que poderiam vir a variar bastante para diferentes passagens em um mesmo trecho, caso fossem determinados por *smartphones*.

A avaliação da variabilidade se deu através da determinação do desvio padrão dos valores de RMSVA para diferentes passagens de cada seção. As Tabelas 8 e 9 mostram os resultados encontrados:

Tabela 8 – Desvios padrão dos valores RMSVA para CE-356

Seção (m)	Valores RMSVA para trechos de 20m (m/s <sup>2</sup> )				Desvio Padrão (m/s <sup>2</sup> )
	1ª Passagem	2ª Passagem	3ª Passagem	Média	
0-20	0,97253	1,46571	0,96232	1,13352	0,29
20-40	0,96401	0,98466	0,77957	0,90942	0,11
40-60	0,84917	0,81915	0,81314	0,82715	0,02
60-80	0,72041	0,97929	1,03095	0,91022	0,17
80-100	0,89288	0,68936	0,99086	0,85770	0,15
<b>Média</b>					<b>0,15</b>

Fonte: Autoria própria

Tabela 9 – Desvios padrão dos valores RMSVA para CE-377

Seção (m)	Valores RMSVA para trecho (m/s <sup>2</sup> )				Desvio Padrão (m/s <sup>2</sup> )
	1ª Passagem	2ª Passagem	3ª Passagem	Média	
0-20	0,90844	1,07400	0,30621	0,76288	0,40
20-40	1,04494	0,95385	2,22948	1,40942	0,71
40-60	0,91974	0,49027	0,87679	0,76227	0,24
60-80	0,52835	1,14224	1,92143	1,19734	0,70
80-100	1,27644	0,44120	1,60644	1,10803	0,60
<b>Média</b>					<b>0,53</b>

Fonte: Autoria própria

Para a CE-356 os valores de desvio padrão apresentam uma diferença regular na primeira seção, com uma variação de aproximadamente de 30% em relação ao RMSVA médio. Enquanto que em outras seções, isto é a terceira, o desvio padrão foi de apenas 2%, apresentando uma variação média de 15%. Acredita-se que a variabilidade dos valores de RMSVA para esta rodovia foi próxima de um limite aceitável uma vez que uma variação de até 10% em uma faixa de IRI provavelmente não resultaria em erros de classificação de uma rodovia.

Para a CE-377 os resultados foram bem mais expressivos, principalmente na segunda e quarta seção onde as variações em relação ao RMSVA médio chegavam a aproximadamente 70%. Para esta rodovia o desvio padrão médio foi de 53%.

Com esses resultados, percebe-se que os sinais de aceleração obtidos para uma mesma rodovia podem, em alguns casos, variar significativamente. Concluiu-se que esses maiores valores de desvios padrão podem ter sido mais significativos devido ao número de

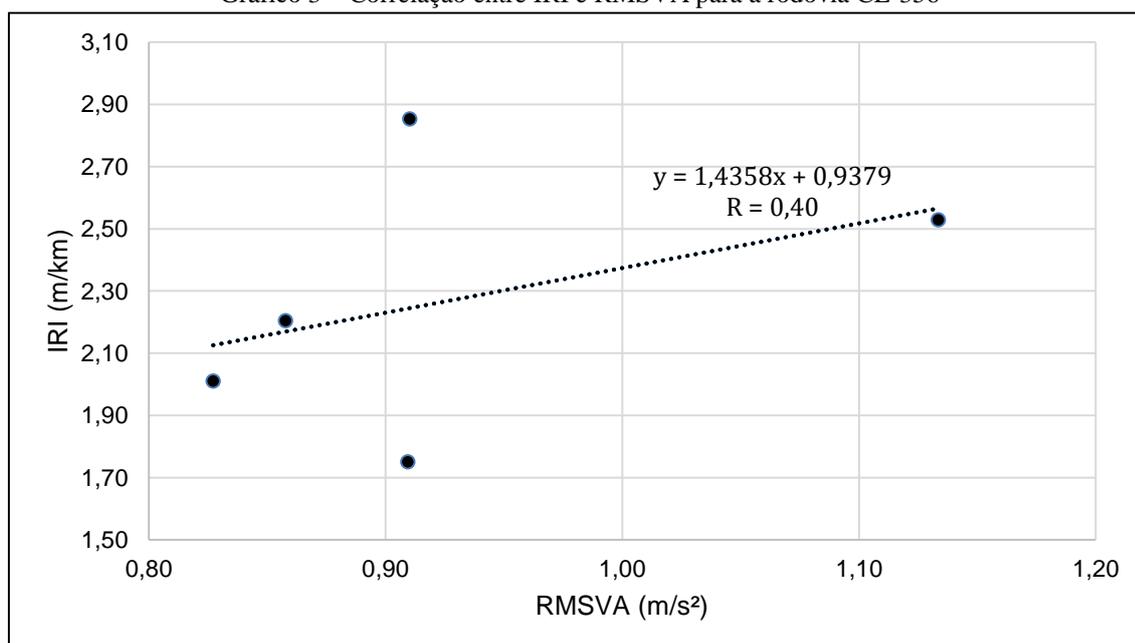
passagens realizadas, uma vez que uma média mais precisa e uma maior quantidade de valores RMSVA pudessem vir a influenciar de maneira positiva tais resultados. Uma maior quantidade de dados de aceleração através de um comprimento maior das seções também pode ser outra razão.

Embora os fatores que impactam diretamente na variabilidade dos valores RMSVA sejam aspectos como constância da velocidade, influência do ruído gerado pelo *smartphone*, posição lateral do veículo e coincidência dos pontos de início e término dos trechos, tais condições não apresentaram grande impacto em trabalhos semelhantes como o de Bisconsini (2016), onde o maior desvio padrão médio determinado foi de 27% para seções de 100 metros de um total de 500 metros e com 10 viagens de coleta para cada seção, o que revela que resultados razoáveis podem ser alcançados para quanto a classificação de um pavimento em um SGP em nível de rede.

#### 4.3 Correlação dos dados determinados pelo método do Nível e Mira e pelo *smartphone*

A partir do IRI determinado pelo método do Nível e Mira e dos valores RMSVA calculados através das acelerações verticais do *smartphone* Xiaomi MI A1, foram elaborados gráficos de dispersão que indicassem o nível de correlação entre esses parâmetros, para as rodovias abordadas nesse estudo. No Gráfico 3 são apresentados os resultados para o trecho da CE-356, com seu respectivo coeficiente de correlação de Pearson (R).

Gráfico 3 – Correlação entre IRI e RMSVA para a rodovia CE-356



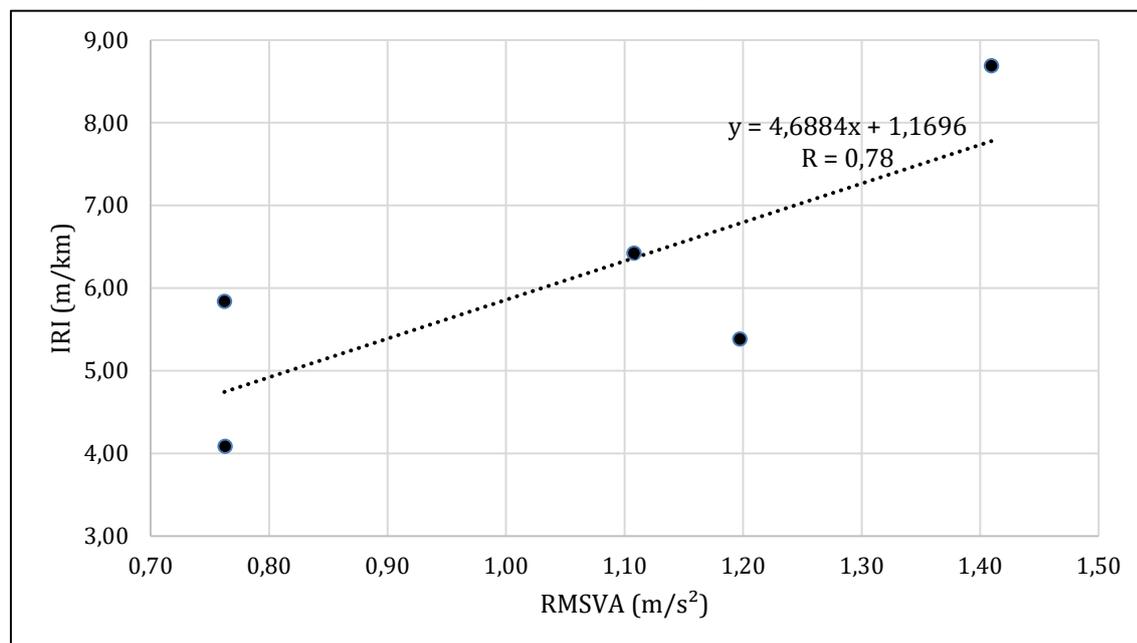
Fonte: Autoria própria.

Para o trecho desta rodovia, percebe-se por meio de seu coeficiente de Pearson ( $R=0,40$ ) que não houve uma boa correlação entre os dois parâmetros. Embora uma conclusão prévia levasse a acreditar que este resultado se deu devido ao *smartphone*, como uma ferramenta não genuína para a análise do pavimento, outros fatores podem ter influenciado o mesmo. O primeiro deles se trata da própria variação dos valores de RMSVA obtidos em diferentes passagens, apesar de terem sido menores do que aquelas observadas na CE-377, os valores encontrados não se encontravam próximas do valor de RMSVA “real”, o que se acredita que pode ser corrigido adotando-se um maior número de passagens.

O segundo motivo é a menor variação do nível de irregularidade do pavimento, que apresentou uma média de 2,27 m/km e sendo o maior e menor valor 2,85 m/km e 1,75 m/km, respectivamente. Uma vez que o pavimento apresenta uma variação menor entre os níveis de irregularidade, o sistema de suspensão do veículo também se encontra menos suscetível às excitações do mesmo, o que acaba por influenciar os valores de RMSVA, se mantendo quase constantes ao longo de todo o trecho com valores próximos de 0,90 m/s<sup>2</sup> (Tabela 4.7), com uma variação significativa apenas no início do trecho.

Em trabalhos semelhantes como o de Bisconsini (2016), o mesmo foi observado em uma pista de aeroporto, onde os valores de RMSVA também não sofreram uma grande variação e levaram a um coeficiente de correlação de 0,30 para a mesma velocidade operacional abordada neste estudo (60 km/h). Além disso, o ruído gerado pelo próprio aparelho também tende a influenciar ainda mais os valores de RMSVA quando o pavimento apresenta um baixo nível de irregularidade, visto que essas pequenas vibrações são mais significativas quando as amplitudes dos sinais de aceleração são pequenas. Esta abordagem se torna ainda mais clara ao se analisar o gráfico de dispersão obtido para a CE-377, Gráfico 4 abaixo:

Gráfico 4 – Correlação entre IRI e RMSVA para a rodovia CE-377



Fonte: Autoria própria.

Conforme é apresentado no gráfico, é possível perceber, pelo valor do coeficiente de Pearson ( $R=0,78$ ) determinado, que houve uma forte correlação entre os resultados de IRI e RMSVA para a CE-377. De maneira oposta ao que foi observado na CE-356, não houve uma constância nos valores de RMSVA ao longo do trecho (Tabela 3), o que pode ser atribuído ao alto nível de irregularidade do trecho e que contribuiu para o coeficiente de Pearson obtido, isto é, valores RMSVA mais próximos daqueles correspondentes ao IRI.

Apesar de resultados diferentes terem sido alcançados para cada rodovia, percebe-se que realmente existe uma correlação linear entre esses dois parâmetros. Estudos realizados por outros autores também chegaram a conclusões semelhantes.

Buttlar e Islam (2014), por exemplo, que analisaram a correlação entre o IRI determinado por dados de smartphone com o de um perfilômetro inercial, também concluíram essa correlação linear e a capacidade do uso dos *smartphones* na avaliação do pavimento. Embora, seja importante notar que nesse e outros estudos a calibração deste sistema medidor do tipo-resposta com um sistema de referência foi fundamental para a obtenção de dados autênticos e que garantisse uma avaliação de qualidade da irregularidade do pavimento.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões determinadas através da análise dos resultados do presente estudo, e, por fim, proposições de trabalhos futuros relacionados ao uso de smartphones para a avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos.

### 5.1 Conclusões

O presente estudo foi elaborado visando determinar o potencial do uso de *smartphones* como uma nova ferramenta na determinação do índice de irregularidade longitudinal do pavimento, uma vez que poderia possibilitar uma coleta de dados mais eficiente, de custo menor e de fácil implementação quando comparado a outros sistemas existentes. Para tanto, foram escolhidos dois trechos de rodovias de 100 metros com níveis de irregularidade do pavimento distintos, inicialmente foram determinados seus índices de irregularidade longitudinal para seções de 20 metros através do método Nível e Mira, que seria utilizado como método de calibração.

Em seguida, foram coletados sinais de aceleração vertical dos mesmos trechos por meio de um *smartphone* fixado no painel de um veículo. Através desses dados obteve-se valores *Root Mean Square Vertical Acceleration* (RMSVA) que foram correlacionados com os dados de Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI) do método de calibração. Os resultados mostraram que os *smartphones* têm capacidade de adquirir dados relacionados a irregularidade do pavimento, mais especificamente ao IRI.

Apesar de nesta pesquisa a rodovia de baixo IRI (CE-356) ter demonstrado uma correlação menor com os valores RMSVA, o nível de correlação obtido com a CE-377 apontou resultados bastante promissores, mesmo com uma variação na variabilidade dos valores RMSVA, o que indica que com uma maior quantidade de dados é possível obter resultados mais precisos e uma correlação ainda maior.

É importante ressaltar, que, como um medidor do tipo resposta, o uso de *smartphones* na determinação da irregularidade do pavimento também requer a calibração do sistema, através da manutenção da suspensão do veículo, pressão dos pneus, além da comparação dos níveis de irregularidade com os de perfis de estradas de irregularidade conhecida ou com o de outros sistemas medidores de calibração, para se evitar erros e garantir a obtenção de dados autênticos. A influência desses fatores nos resultados da irregularidade

determinados por smartphone são outro ponto que pode ser abordado em estudos futuros, avaliando o impacto que a utilização de diferentes veículos e aparelhos smartphone podem ter nos resultados de IRI.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

O desenvolvimento de aplicativos que determinem diretamente o IRI e a utilização de uma grande base de dados com a aplicação de diferentes *smartphones*, veículos e rodovias pode levar a um maior aprimoramento desta ferramenta. Um cenário ideal para esta aplicação se trata justamente de um sistema de gerência de pavimentos (SGP), o que não apenas poderia contribuir no desenvolvimento deste instrumento, como também difundir o mesmo. Regiões de gestão rodoviária com recursos limitados para o monitoramento do pavimento são boas opções para o estudo da aplicação destes dispositivos em um SGP devido ao custo reduzido e praticidade do equipamento.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, F. S.; OLIVEIRA, R. F. S. Avaliação de perfil longitudinal de pavimento de concreto de cimento Portland com perfilômetro inercial a laser. **TRANSPORTES**, v. 25, n. 1, p.82-92, mar. 2017. DOI 10.14295/transportes.v25i1.1138. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1138>. Acesso em: 05 abr. 2019.

ALESSANDRONI, G.; KLOPFENSTEIN L. C.; DELPRIORI S.; DROMEDARI M.; LUCHETTI G.; PAOLINI B. D.; SERAGHITI A.; LATTANZI E.; FRESCHI V.; CARINI A.; BOGLIOLI A. Smartroadsense: Collaborative road surface condition monitoring. **International Academy, Research, and Industry Association (IARIA)**, Roma, v. 1, 8., p. 210-215, 2014. UBICOMM 2014 – The Eight International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies, 2014, Roma. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/271700011\\_SmartRoadSense\\_Collaborative\\_Road\\_Surface\\_Condition\\_Monitoring](https://www.researchgate.net/publication/271700011_SmartRoadSense_Collaborative_Road_Surface_Condition_Monitoring). Acesso em: 10 nov. 2019.

ALMEIDA, L. C. **Aplicativo para smartphones destinado à medição da irregularidade longitudinal em rodovias**. 2018. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BARELLA, R. M. **Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

BENEVIDES, S. A. S. **Modelos de desempenho de pavimentos asfálticos para um sistema de gestão de rodovias estaduais do Ceará**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2008. p.401-413.

BISCONSINI, D. R. **Avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos com dados coletados por smartphones**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

BUTTLAR, W. G.; ISLAM, S. Measurement of pavement roughness using na *Android*-based smartphone application. **Transportation Research Board 93<sup>rd</sup> Annual Meeting**, Washington D. C., v. 2457, n. 1, p. 30-38, jan. 2014.

CAMPOS, A. C. R. **Métodos de previsão de desempenho de irregularidade longitudinal para pavimentos asfálticos**: aplicação e proposição de critérios de ajuste. 2004. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2004.

CAREY, W. N.; IRICK, P. E. The pavement serviceability-performance concept. **Highway Research Board Bulletin**, n.250, p.40-58, USA, 1960. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/1284779>. Acesso em: 09 nov. 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES – CNT. **Relatório Gerencial**: Pesquisa CNT de Rodovias 2019. 23ª ed. Brasília: CNT, SEST, SENAT, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 173/86**: Método de nível e mira para calibração de sistemas medidores de irregularidade tipo resposta. DNER, 1986.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-PRO 182/94**: Medição da irregularidade de superfície de pavimento com sistemas integradores IPR/USP e maysmeter. DNER, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos**. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro. 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Gerência de Pavimentos**. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro. 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro. 2006.

DOUANGPHACHANH, V.; ONEYAMA, H. Using Smartphones to estimate road pavement condition. In: **International Symposium for Next Generation Infrastructure**. Wollongong, Australia. 2013. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/1666/67c80da565c389b4ab115bcb8ae1017f06c0.pdf>. Acesso em: 2 jan. 2019.

ECHEVERRIA, J. A. S. **Avaliação do efeito de restaurações com fresagem e recapeamento nas condições funcional e estrutural de pavimentos com volume de tráfego médio**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia

Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2011.

FORSLÖF, L.; JONES, H. Roadroid: continuous road condition monitoring with smart phones. In: IRF 17th World Meeting and Exhibition, 17., 2013, Riyadh, Saudi Arabia. **Jornal of Civil Engineering and Architecture**, Nova York, David Publishing, 2015, p. 485-489. Disponível em: <http://www.roadroid.com/common/References/IRF>. Acesso em: 2 jan. 2019.

GILLESPIE, T. D.; PATERSON, W. D. O.; SAYERS, M. W. Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements. **World Bank Technical Paper**, Washington D.C., 1986, Number 46, p.87. Disponível em: <http://www.roadroid.com/common/References/IRF>. Acesso em: 2 jan. 2019.

GSMA. **Economia móvel na américa latina 2019**. Londres, 2019. Disponível em: <https://www.gsma.com/latinamerica/pt-br/resources/economia-movel-na-america-latina-2019/>. Acesso em: 4 nov. 2019.

HAAS, R.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. **Modern pavement management**. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1994.

HANSON, T. R.; CAMERON, C. **Can a smartphone collect IRI data?** Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada – Transportation: Innovations and Opportunities Fredection, NB, Canada. 2012. Disponível em: <https://www.tac-atc.ca/en/conference/papers/can-smartphone-collect-iri-data>. Acesso em: 2 jan. 2019.

HANSON, T.; 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**, v. 41, n. 9, 2014, p. 819-827.

HODGE, V. J.; O'KEEFE, S.; WEEKS, M.; MOULDS, A. Wireless sensor networks for condition monitoring in the railway industry: a survey. **IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS**, v. 16, n.3, p.1088-1106, jun. 2015. ISSN 1524-9050. DOI 10.1109/TITS.2014.2366512. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6963375>. Acesso em: 05 abr. 2019.

NEW URBAN MECHANICS. **About Street Bump**. Boston, 2015. Disponível em: <http://www.streetbump.org/about>. Acesso em: 11 nov. 2019.

NIKOLAIDES, A. **Highway engineering: pavements, materials and control of quality**. Boca Raton: Taylor & Francis Group; CRC Press. 2015. p.738-753

PATERSON, W. D. O. International roughness index: relationship to other measures of roughness and riding quality. **Transportation Research Record**. n.1084: Washington, 1986. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1986/1084/1084-007.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2019.

PINTO, R. S. **Avaliação de irregularidade longitudinal (IRI) em restauração da rodovia no noroeste do Rio Grande do Sul**: um estudo de caso sobre a ERS 223. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, UNIJUÍ, Ijuí, 2018.

QUEIROZ, C. A. V. **A procedure for obtaining a stable roughness scale from rod and level profiles**. Working document 22, Research on Interrelationships between Costs of Highway Construction, Maintenance, and Utilization. GEIPOT, Brazil. 1981.

QUEIROZ, C. A. V. **Modelos de previsão de desempenho para a gerência de pavimentos no Brasil**. Brasília: GEIPOT, 1984, p. 366.

SAYERS, M. W. On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile. **Transportation Research Record**, n.1501, p.1-12, 1995. ISSN: 0361-1981. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/452992>. Acesso em: 07 nov. 2019.

SAYERS, M. W.; KARAMIHAS, S. M. **The little book of profiling**. Ann Arbor: Transportation Research Institute, University of Michigan, USA. Disponível em: <http://www.umtri.umich.edu/content/LittleBook98R.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2019.

SONCIM, S. P. **Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de pavimentos asfálticas com base em dados da rede de rodovias do Estado da Bahia**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

VOGEL, C. R. **Acompanhamento da irregularidade longitudinal pós-restauração de pavimento em concreto asfáltico de rodovia estadual do nordeste do estado do Rio Grande do Sul**. 2015. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, UNIJUÍ, Santa Rosa, 2015.

WAZE INC. **Waze – GPS, mapas, alertas Trânsito em tempo real**. Versão 4.64.0.1. Israel: 2019. Disponível em: [https://play.google.com/store/apps/details?id=com.waze&hl=pt\\_BR](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.waze&hl=pt_BR). Acesso em: 11 nov. 2019.