



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

**LUCAS CAVALCANTE DE ALMEIDA**

**APLICATIVO PARA *SMARTPHONE* DESTINADO À MEDIÇÃO DA  
IRREGULARIDADE LONGITUDINAL EM RODOVIAS**

**FORTALEZA**

**2018**

LUCAS CAVALCANTE DE ALMEIDA

APLICATIVO PARA *SMARTPHONE* DESTINADO À MEDIÇÃO DA  
IRREGULARIDADE LONGITUDINAL EM RODOVIAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes

Orientador: Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior.

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.

FORTALEZA  
2018

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)

---

A448a Almeida, Lucas Cavalcante de.

Aplicativo para smartphone destinado à medição da irregularidade longitudinal em rodovias / Lucas Cavalcante de Almeida. – 2018.

95 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Junior.

Coorientação: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira

1. Smartphone. 2. Irregularidade Longitudinal. 3. IRI. 4. Aplicativo. I. Título.

CDD 388

---

LUCAS CAVALCANTE DE ALMEIDA

APLICATIVO PARA *SMATPHONE* DESTINADO À MEDIÇÃO DA IRREGULARIDADE  
LONGITUDINAL EM RODOVIAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes

Aprovada em: 17/05/2018.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Mário Angelo Nunes de Azevedo Filho (Examinador Interno)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. José Leomar Fernandes Júnior (Examinador Externo)  
Universidade de São Paulo (USP)

---

Prof. Ph. D. José Weissman (Examinador Externo)  
University of Texas at Austin (UT Austin)

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, por conceder-me força e coragem não só para concluir esta dissertação, mas durante toda a vida.

Aos meus pais, Carlos e Luzimar, e meus irmãos, Rafael e Kerla, por serem essenciais em minha vida. Muito obrigado pelo incentivo e sábios conselhos.

À minha noiva e futura esposa, Talita, por me ajudar a suportar esta difícil caminhada e, algumas vezes, minhas preocupações e aflição em relação ao desenvolvimento deste trabalho. Muito obrigado por estar sempre ao meu lado e torcer e vibrar por mim em cada conquista.

Ao professor e amigo Heber Oliveira, que além de fazer parte da minha vida acadêmica contribuiu para meu amadurecimento profissional e pessoal, através de sua dedicação, paciência, atenção e “empréstimos” de materiais.

Ao orientador deste trabalho Prof. Ernesto Ferreira Nobre Júnior, pela orientação e amizade, sempre buscando o melhor e demonstrando bastante interesse e paciência nos mais diversos assuntos abordados.

Aos meus amigos Saulo Passos e Ítalo Mota, que sempre me ajudaram quando precisei, principalmente nos primeiros momentos do mestrado sempre dando conselhos e oferecendo ajuda.

A todos os professores, funcionários e colegas do Departamento de Engenharia de Transportes, em especial à “turma Infra 2016.1” - Jorge Lucas, Manoel Gualberto, Jorge Luís, Raimi, Lara, Regilene, Márcia, Lara, Lívia e Galiza, principalmente pelos momentos de alegria nos intervalos do lanche da professora Suelly e nos churrascos que o Jorge Lucas deixava a carne queimar.

À CAPES pela bolsa de mestrado concedida.

Aos participantes da banca examinadora, pelo interesse e disponibilidade.

“Bendito o homem que confia no SENHOR e  
cuja esperança é o SENHOR.” (Jeremias 17,7)

## RESUMO

Muitos equipamentos estão sendo desenvolvidos para mensurar ou estimar a irregularidade longitudinal dos pavimentos. Sabe-se que valores acima dos limites estabelecidos para esse parâmetro contribui negativamente para a condição funcional dos pavimentos, prejudicando a qualidade de rolamento, aumentando os Custos Operacionais dos Veículos (COV) e reduzindo a vida útil do pavimento. Devido à importância do estudo dessa patologia, este trabalho propõe o desenvolvimento de um aplicativo para *smartphone*, designado SmartIRI, para a estimação do Índice Internacional de Irregularidade (IRI - *International Roughness Index*), parâmetro que melhor representa a irregularidade longitudinal de pavimentos flexíveis. A ferramenta proposta é embarcada em um veículo por meio de um suporte fixado no para-brisas e baseia-se na utilização de sensores presentes em *smartphones*, tais como o acelerômetro e o sensor do Sistema de Posicionamento Global (GPS - *Global Positioning System*), para a obtenção dos dados de aceleração vertical, velocidade e localização. Os dados provenientes do acelerômetro e do receptor de GPS foram processados de modo a informar o valor do IRI georreferenciado em tempo real. Os testes obtidos após percorrer 165 km mostraram que os valores calculados de IRI apresentaram correlação satisfatória com dados fornecidos por outro aplicativo cuja proposta é a medição de irregularidade longitudinal por medições do perfilômetro a *laser*, por análise subjetiva por meio do Valor de Serventia Atual (VSA), e ainda pelo método de Nível e Mira. Dentre os possíveis usos das medições de irregularidade longitudinal, o SmartIRI foi utilizado como ferramenta de controle da qualidade de execução de remendos e pavimentos rígidos, apresentando-se como uma alternativa aos levantamentos tradicionais. Constatou-se que a utilização do aplicativo desenvolvido pode ser uma alternativa viável, especialmente em locais onde existem poucos recursos financeiros, materiais ou profissionais para este fim e, principalmente, quando aplicados em nível de rede.

**Palavras-chave:** *Smartphone*, Irregularidade Longitudinal, IRI, Aplicativo.

## **ABSTRACT**

Many equipment is being developed to measure or estimate the longitudinal unevenness of the pavements. It is known that values above the limits established for this parameter contribute negatively to the functional condition of the pavements, damaging the rolling quality, increasing the Vehicle Operating Costs (VOC) and reducing the useful life of the pavement. Due to the importance of the study of this pathology, this work proposes the development of a smartphone application, called SmartIRI, to estimate the International Roughness Index (IRI), the parameter that better represents the longitudinal irregularity of flexible pavements. The proposed tool is loaded onto a vehicle by means of a bracket attached to the windshield and is based on the use of sensors present in smartphones, such as the accelerometer and the Global Positioning System (GPS), to obtain the data of vertical acceleration, speed and location. The data from the accelerometer and the GPS receiver were processed in order to inform the user of the IRI georeferenced in real time. The tests obtained after a distance of 165 km showed that the calculated IRI values presented satisfactory correlation with data provided by another application whose proposal is the measurement of longitudinal irregularity by measurements of the laser profilometer by subjective analysis using the Current Service Value (VSA), and by the Level and Rod method. Among the multiple uses of measurements of longitudinal irregularity, SmartIRI was used as a tool to control the quality of execution of patches and rigid pavements, presenting itself as an alternative to traditional surveys. It was found that the use of the developed application can be a viable alternative, especially in places where there are few financial, material or professional resources for this purpose and, especially, when applied at the network level.

**Keywords:** Smartphone, Longitudinal Irregularity, IRI, Application.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferentes níveis de irregularidades .....	18
Figura 2 – Ciclo de vida do pavimento .....	19
Figura 3 – Variação da carga dinâmica em uma via com elevada irregularidade. ....	20
Figura 4 – Custo operacional em função da condição da via .....	20
Figura 5 – Interação entre os defeitos em rodovias pavimentadas .....	21
Figura 6 – Comparação dos valores limites de IRI para pavimentos novos ou restaurados ....	24
Figura 7 – Modelo Quarto de Carro.....	24
Figura 8 – Diversas faixas de variação do IRI dependendo do caso e situação .....	26
Figura 9 – Exemplos de equipamentos medidores de IRI.....	31
Figura 10 – Sistema de coordenadas de um <i>smartphone</i> .....	35
Figura 11 – Exemplo de dados dos sensores do <i>smartphone</i> .....	36
Figura 12 – Classificação dos <i>smartphones</i> com relação aos demais equipamentos de medição de irregularidade .....	37
Figura 13 – Exemplo dos aplicativos <i>BumpRecorder</i> (a) e <i>Roadroid</i> (b).....	39
Figura 14 – Etapas do processo metodológico .....	41
Figura 15 – Suporte e posição do aparelho no veículo .....	43
Figura 16 – Veículo utilizado na coleta de dados.....	43
Figura 17 – Tela do aplicativo para nivelamento do aparelho .....	45
Figura 18 – Resultado do Arquivo de Medição pelo SmartIRI.....	46
Figura 19 – Modelo para obtenção do IRI .....	49
Figura 20 – Gráfico com valores de IRI do trecho experimental .....	50
Figura 21 – Gráfico comparativo entre as medições .....	51
Figura 22 – Resultado do Teste-t de <i>student</i> .....	52
Figura 23 – Correlação entre IRI do Aplicativo de Referência e do IRI do SmartIRI .....	53
Figura 24 – Gráfico de linhas comparando Aplicativo de Referência e SmartIRI.....	53
Figura 25 – Detalhe da textura e visão geral do trecho.....	54
Figura 26 – Comparativo entre os equipamentos de medição.....	56
Figura 27 – Mapa gerado pelo SmartIRI.....	57
Figura 28 – Detalhe da parte final da medição.....	57
Figura 29 – Defeitos observados .....	58
Figura 30 – Aspectos da texturização das superfícies .....	61
Figura 31 – Trechos em CCP avaliados com o SmartIRI .....	62

Figura 32 – Trecho BR-020 – Serviço de manutenção .....	63
Figura 33 – Teste de Hipótese para a média .....	63
Figura 34 – Vista geral e detalhe dos remendos .....	64
Figura 35 – Localização dos trechos.....	66
Figura 36 – Comparativo VSA e SmartIRI .....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condição de Superfície do Pavimento.....	22
Tabela 2 – Comparativo HDM-4 e DNIT (2011).....	23
Tabela 3 – Previsão de Custo Operacional de Veículos - Brasil.....	27
Tabela 4 – Vantagens e desvantagens das classes de equipamentos medidores de IRI .....	32
Tabela 5 – Matriz de custos e performance operacional.....	32
Tabela 6 – <i>Ranking</i> dos equipamentos.....	33
Tabela 7 – Classificação proposta pelo SmartIRI.....	46
Tabela 8 – Classificação das condições de trafegabilidade proposta para o SmartIRI.....	47
Tabela 9 – Comparativo dos valores de IRI entre Perfilômetro a <i>Laser</i> e SmartIRI.....	56
Tabela 10 – Comparativo dos valores de IRI do trecho em Tauá-CE - BR-020.....	58
Tabela 11 – Classificação da Textura .....	59
Tabela 12 – Dados estatísticos (IRI) – Pavimento Rígido .....	60
Tabela 13 – Intervalos de valores e conceitos qualitativos .....	65
Tabela 14 – Valores de VSA e IRI (SmartIRI) .....	65
Tabela 15 – Valores Estatísticos de VSA e IRI (SmartIRI).....	66
Tabela 16 – Valores de Correlação e Determinação de VSA e IRI (SmartIRI).....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNT	Confederação Nacional dos Transportes
COV	Custo Operacional Veicular
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
GEIPOT	Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes
HDM	<i>Highway Development and Maintenance</i>
ICPF	Índice de Condição do Pavimento Flexível
IES	Índice de Estado da Superfície
IGGE	Índice de Gravidade Global Expedito
INPC	Índice Nacional de Preços ao Consumidor
IRI	<i>International Roughness Index</i>
LVC	Levantamento Visual Contínuo
RMSVA	<i>Root Mean Square Vertical Acceleration</i>
RTRRMS	<i>Responde-Type Road Roughness Measuring System</i>
SGP	Sistema de Gerência de Pavimentos
UFC	Universidade Federal do Ceará
VSA	Valor de Serventia Atual

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	Contextualização.....	13
1.2	Justificativa.....	14
1.3	Questões de pesquisa.....	15
1.4	Objetivos.....	16
1.5	Estrutura do Trabalho.....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
2.1	Estudo da Irregularidade Longitudinal na gerência de pavimentos.....	18
2.1.1	<i>Abordagem dos Manuais de Restauração e Gerência do DNIT sobre Irregularidade Longitudinal.....</i>	<i>21</i>
2.2	Irregularidade Longitudinal.....	24
2.2.1	<i>Escalas e características do IRI.....</i>	<i>25</i>
2.3	Influência da irregularidade longitudinal nos custos para o usuário.....	26
2.4	Equipamentos utilizados na medição da Irregularidade Longitudinal.....	29
2.5	Utilização do RMS para cálculo da Irregularidade Longitudinal.....	34
2.6	<i>Smartphones e sensores móveis.....</i>	<i>35</i>
2.7	<i>Utilização de smartphones e sensores móveis na avaliação funcional dos pavimentos.....</i>	<i>36</i>
2.8	Pesquisas relacionadas a utilização de <i>smartphones</i> e sensores móveis para estimar a condição do pavimento.....	38
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>40</b>
3.1	Resumo do método.....	40
3.2	Etapas do processo metodológico.....	40
3.3	Obtenção do modelo para o cálculo da irregularidade longitudinal.....	42
3.3.1	<i>Equipamentos.....</i>	<i>42</i>

3.3.2	<i>Coleta de dados</i> .....	44
3.4	Processamento dos dados de irregularidade longitudinal .....	45
3.5	Trechos analisados na calibração do sistema .....	46
3.6	Classificação e conceito proposto pelo aplicativo .....	47
4	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>49</b>
4.1	Resultados obtidos pela análise estatística da modelagem .....	49
4.2	Calibração e resultados obtidos em campo através do método de Nível e Mira.....	50
4.3	Resultados obtidos na comparação do aplicativo de referência e o SmartIRI .....	51
4.3.1	<i>Teste-t de student para comparação entre as médias (Aplicativo de Referência e SmartIRI)</i> .....	52
4.3.2	<i>Aplicativo de Referência ('Roadlab') e o SmartIRI</i> .....	52
4.3.3	<i>Análise de Dados Obtidos por Perfilômetro a Laser e o SmartIRI</i> .....	55
4.3.4	<i>Avaliação do Controle de Qualidade do Processo Executivo (Pavimento Rígido e Remendos)</i> .....	60
4.3.5	<i>Avaliação Subjetiva (VSA) e o SmartIRI</i> .....	64
4.3.6	<i>Considerações sobre os Resultados Obtidos</i> .....	67
5	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>69</b>
5.1	Conclusões .....	69
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	71
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>72</b>
	<b>APÊNDICE</b> .....	<b>77</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>83</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo mostra a abrangência desta Dissertação e apresenta a importância da irregularidade longitudinal em rodovias, assim como este parâmetro é inserido em um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP). Serão apresentados, também, a contextualização e a justificativa do trabalho, as questões de pesquisa, os objetivos, a metodologia e a estrutura do trabalho.

## 1.1 Contextualização

O desenvolvimento socioeconômico de um país está fortemente relacionado com as condições das infraestruturas de transportes. Pesquisas recentes, como CNT (2017), apontam que a maioria dos trechos rodoviários brasileiros ainda não oferecem as condições adequadas aos usuários, apresentando problemas nos pavimentos, na sinalização e na geometria. Soma-se a isso o fato da carência de manutenção adequada por longos períodos e o fato de serem destinados poucos recursos para tal e somente para recuperar parcialmente a condição funcional do pavimento.

Diante do panorama exposto sobre a infraestrutura, sabendo-se que o Brasil possui mais de 61% de utilização do modo rodoviário para o transporte de cargas e ainda de acordo com CNT (2017), é de fundamental importância que a qualidade das rodovias no Brasil, sejam elas pavimentadas ou não, estejam em boas condições de trafegabilidade, de forma que não onere os gastos públicos e do usuário, e atendam às necessidades dos usuários, principalmente nos quesitos segurança e conforto ao rolamento.

Devido ao desequilíbrio na matriz de transportes de cargas, o modo rodoviário, ideal para o deslocamento de pessoas e bens em curtas e médias distâncias, também tem sido utilizado nas viagens de longas distâncias, dependendo sempre de rodovias em condições adequadas para a sua utilização em termos econômicos favoráveis (CNT, 2017). Informações sobre as condições estruturais e funcionais de um pavimento, assim como dados sobre o seu perfil longitudinal, são úteis e importantes para a análise da irregularidade da superfície, comumente mensurada pelo Índice Internacional de Irregularidade (*International Roughness Index – IRI*).

Sabe-se que a irregularidade longitudinal, além de afetar a segurança e o conforto dos usuários, também compromete a vida útil do pavimento. Obter dados sobre os perfis dos pavimentos é uma atividade importante que deve alimentar os Sistemas de Gerência de

Pavimentos (SGP) e auxiliar os gestores no processo de tomada de decisão quanto às prioridades na utilização dos recursos destinados à manutenção e reabilitação de pavimentos.

Sabendo dos problemas causados pela irregularidade longitudinal nos pavimentos e que, para se obter informações de um perfil longitudinal existe um alto custo financeiro (equipamentos modernos) e de tempo (equipamentos/métodos tradicionais), é importante que a mensuração desse defeito seja feita de forma correta. Com o advento das novas tecnologias, novos equipamentos estão sendo utilizados para obtenção da irregularidade longitudinal. Sabe-se que já existem vários métodos de medição e, também, que existem diferenças entre os resultados desses métodos, principalmente no que diz respeito à acurácia e à conveniência (TOMIYAMA *et al.*, 2012).

Novos métodos para obtenção da irregularidade longitudinal também estão sendo desenvolvidos, dentre os quais inclui-se a utilização de *smartphones* como possibilidade de obter dados oriundos do perfil longitudinal, principalmente para os países em desenvolvimento que possuem restrição orçamentária.

A utilização de *smartphones* pode ser uma alternativa viável para estimar a condição da superfície em termos de irregularidade e do conforto ao rolamento verificado pelos usuários devido à ação da aceleração vertical. Esses aparelhos possuem diversos sensores úteis os quais vários pesquisadores e desenvolvedores estão explorando sua utilização para múltiplas aplicações em diferentes áreas.

## 1.2 Justificativa

Segurança e conforto ao rolamento são as duas principais características percebidas pelos usuários de rodovias. Para que essas propriedades possam ser obtidas satisfatoriamente, os materiais utilizados, as técnicas executivas e as atividades de manutenção e reabilitação precisam ser aplicados do modo mais racional possível.

Ainda se verifica no campo das avaliações de pavimentos, sobretudo no Brasil, processos demorados e dispendiosos, sem normalização técnica específica, utilizando-se poucos equipamentos automatizados e com intensa dependência do ser humano para sua execução. Pode-se afirmar que ainda são poucas as aplicações das novas tecnologias no contexto rodoviário nacional.

Os levantamentos e os dados obtidos por meio desses procedimentos, possuem, por consequência, um elevado grau de subjetividade e empirismo, além de interferir no fluxo normal do tráfego. Assim, a tomada de decisão sobre as ações a serem aplicadas aos



pavimentos pode ser prejudicada e não surtir o efeito esperado, principalmente no que diz respeito à garantia de sua vida útil e a relação custo-benefício.

Uma das vantagens percebidas na utilização das novas tecnologias, como o uso de aplicativos desenvolvidos para *smartphones* na avaliação de pavimentos, é a realização de levantamentos mais rápidos, com maior desempenho e produtividade e sem maiores interferências diretas e constantes do homem. Há, ainda, o fato de que os resultados apresentados são facilmente acessados pelos usuários, bem como visualizados e compreendidos pelos envolvidos no processo de gestão dessas infraestruturas, o que facilita a tomada de decisão.

Diante do exposto, esta Dissertação justifica-se por desenvolver um aplicativo para *smartphones* destinado à estimar a irregularidade longitudinal dos pavimentos rodoviários denominado SmartIRI de modo a auxiliar os processos de tomada de decisão para a manutenção e reabilitação. A implementação de novas tecnologias pode tornar esses processos mais confiáveis, mais rápidos e menos dispendiosos, além de inserir a Engenharia de Transportes, especificamente a Infraestrutura de Transportes, no campo da inovação.

### 1.3 Questões de pesquisa

Diante do exposto na justificativa deste trabalho, surgem as seguintes questões de pesquisa:

- a) Como obter dados de aceleração vertical de um veículo por meio de um *smartphone*?
- b) Como são obtidos os dados de irregularidade longitudinal por meio do *smartphone*?
- c) Como devem ser validados os dados obtidos calculados por meio do aplicativo desenvolvido?
- d) Quais os principais impactos e contribuições para uma gestão de infraestrutura viária, diante do desenvolvimento de um produto que quantifique ou qualifique a irregularidade longitudinal?
- e) Qual a contribuição da inclusão de novas tecnologias na avaliação de pavimentos?

## 1.4 Objetivos

O objetivo geral é desenvolver um aplicativo para *smartphones* que forneça uma estimativa tanto qualitativa como quantitativa da irregularidade longitudinal por meio do IRI.

Como objetivos do trabalho, podem ser destacados:

- a) obter dados da aceleração vertical imposta ao veículo pela superfície do pavimento por meio de sensores presentes no *smartphone*;
- b) mensurar a irregularidade longitudinal após a coleta dos dados de aceleração vertical;
- c) comparar as quatro formas de obtenção do IRI por meio de uma verificação da irregularidade longitudinal com Nível e Mira, perfilômetro a *laser*, um aplicativo de referência e uma avaliação subjetiva e confrontar os valores obtidos;
- d) avaliar serviços de manutenção de pavimentos por meio do aplicativo desenvolvido;
- e) analisar a potencial inclusão de novas tecnologias na avaliação funcional dos pavimentos.

## 1.5 Estrutura do Trabalho

Além deste capítulo introdutório, este trabalho é composto por mais quatro capítulos, descritos a seguir.

O Capítulo 2 contém as definições estudadas em artigos, teses, dissertações e documentos de agências reguladoras nacionais sobre irregularidade longitudinal de pavimentos rodoviários, parâmetros para avaliação funcional de pavimentos, classes de equipamentos medidores de irregularidades, influências da irregularidade longitudinal na gerência de pavimentos e conceitos estatísticos para elaboração do modelo utilizado pelo aplicativo.

O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos, equipamentos utilizados, tratamento dos dados, descrição dos trechos estudados e modelagem estatística para o cálculo da irregularidade.

O Capítulo 4 apresenta a análise comparativa de resultados para os trechos estudados utilizando método de Nível e Mira, perfilômetro a *laser*, análise subjetiva e um aplicativo de referência, além da avaliação do processo executivo imediatamente após a

execução de revestimento em pavimento rígido e atividade de manutenção em pavimento flexível.

O Capítulo 5 apresenta a conclusão e as proposições para trabalhos futuros. Por conseguinte, constam apêndices e anexo que foram utilizados na elaboração desta Dissertação.

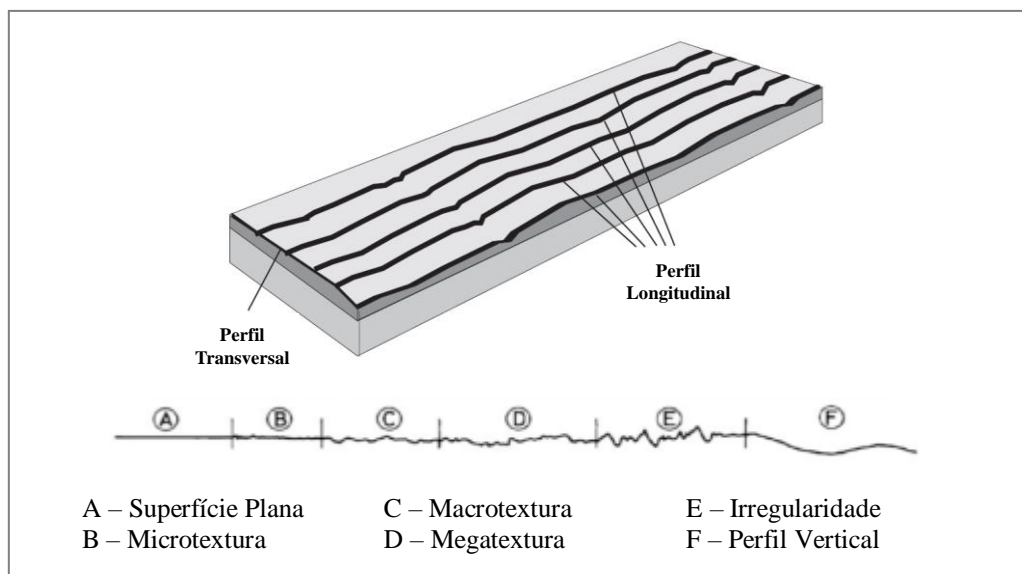
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão apresentados conceitos sobre Irregularidade Longitudinal de pavimentos e como os Manuais de Restauração e Gerência do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) abordam esse tema, principalmente voltado para Gerência de Pavimentos. Posteriormente, serão abordados assuntos sobre escalas e características do Índice Internacional de Irregularidade (*International Roughness Index – IRI*), equipamentos de medição, assim como classificação, características, vantagens e desvantagens desses equipamentos. Em seguida, tópicos sobre aplicação de novas tecnologias serão descritos, como utilização de *smartphones* e sensores móveis na avaliação de pavimentos e alguns trabalhos realizados no contexto internacional sobre a utilização desses dispositivos para avaliar a condição funcional dos pavimentos.

### 2.1 Estudo da Irregularidade Longitudinal na gerência de pavimentos

De acordo com DNIT (2006), o conceito de Irregularidade Longitudinal de um pavimento é o conjunto dos desvios da superfície do pavimento em relação a um plano de referência. Esses desvios tendem a prejudicar a qualidade do rolamento e a ação dinâmica das cargas sobre a via e os componentes dos veículos. A Figura 1 mostra os diferentes níveis de condições de irregularidades.

Figura 1 – Diferentes níveis de irregularidades

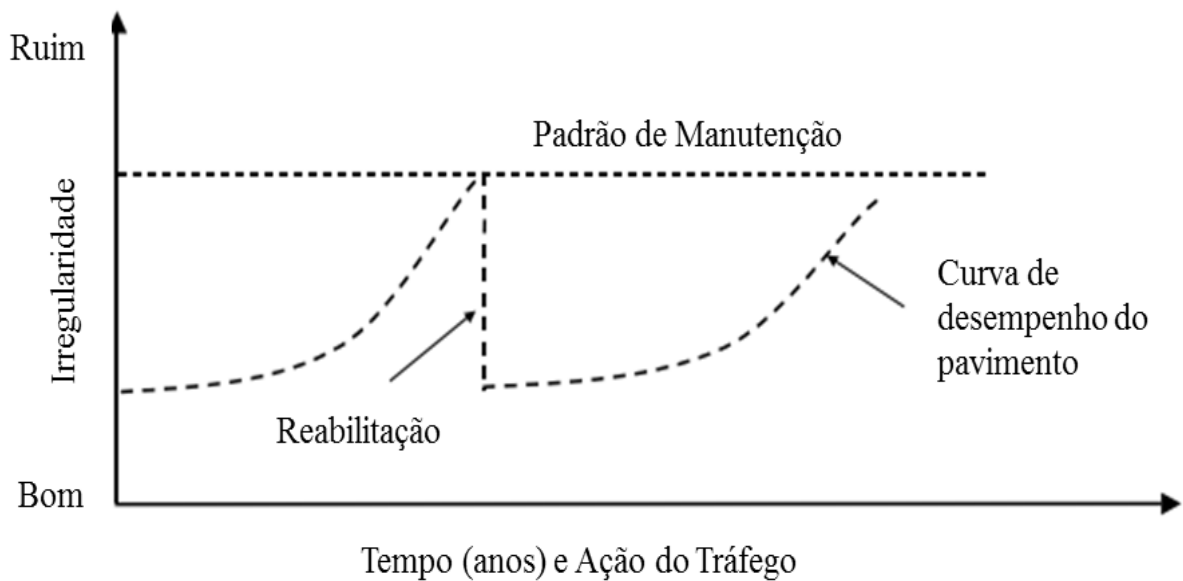


Fonte: Adaptado de Douangphachanh (2014).

Ainda de acordo com DNIT (2006), existem vários índices para classificar as condições de superfície do pavimento; no entanto, mais frequentemente, utiliza-se o IRI. De acordo com Bernucci *et al.* (2007), o IRI é um índice estatístico, comumente expresso em m/km, que quantifica os desvios da superfície do pavimento em relação à de projeto, e tem sido utilizado como ferramenta de controle de obras e aceitação de serviços em alguns países, tais como Suécia e Japão.

A Irregularidade Longitudinal, comumente medida pelo IRI, apresenta várias particularidades, dentre elas pode-se destacar que, a partir de um valor inicial, função do processo construtivo, a irregularidade passa a assumir valores crescentes (Figura 2), como decorrência da ação do tráfego, do clima e de outros fatores de deterioração.

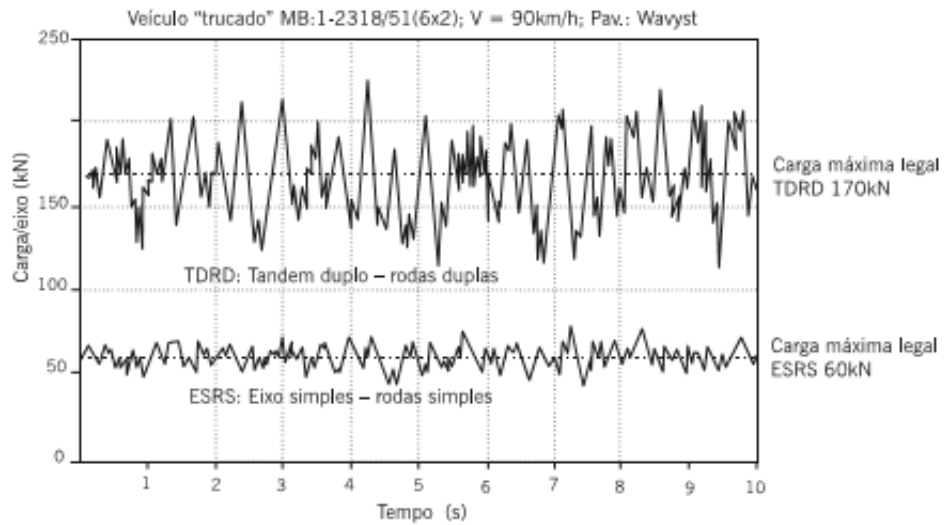
Figura 2 – Ciclo de vida do pavimento



Fonte: Adaptado de Kerali, Odoki e Stannard (2000).

A irregularidade influi na interação da superfície da via com os veículos, gerando efeitos sobre os próprios veículos, sobre os passageiros e motoristas, e sobre as cargas transportadas. Tais efeitos dependem também, de fatores vinculados à suspensão dos veículos e à sensibilidade dos passageiros e das cargas. A Figura 3 mostra a variação da carga dinâmica em uma via com elevada irregularidade (IRI = 4,4 m/km).

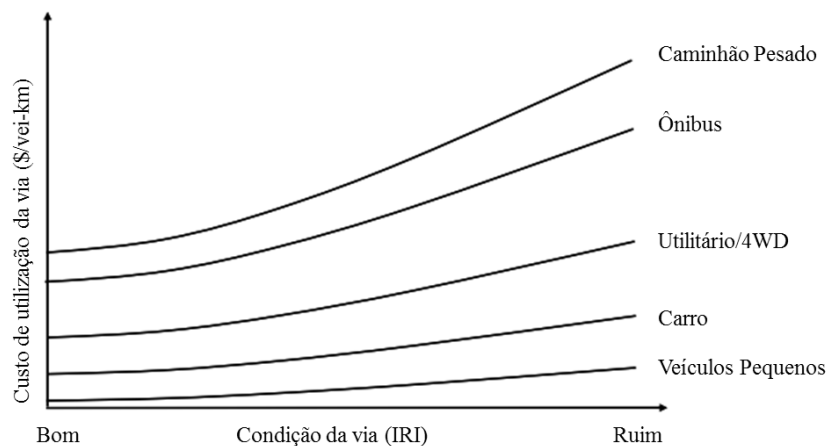
Figura 3 – Variação da carga dinâmica em uma via com elevada irregularidade.



Fonte: Fernandes Jr. e Barbosa (2000).

Segundo DNIT (2006), o aumento da ação das cargas dinâmicas dos veículos sobre a superfície do pavimento devido à presença de irregularidade, acelera a deterioração de sua estrutura, e também, possui grande influência sobre o custo operacional dos veículos (gasolina, pneus, óleo, suspensão, etc.), custos no tempo de viagem, custos econômicos devido a acidentes e o custo social e ambiental devido à emissão de poluentes e poluição sonora. A Figura 4 mostra o efeito da condição da via em relação ao custo operacional para cada tipo de veículo.

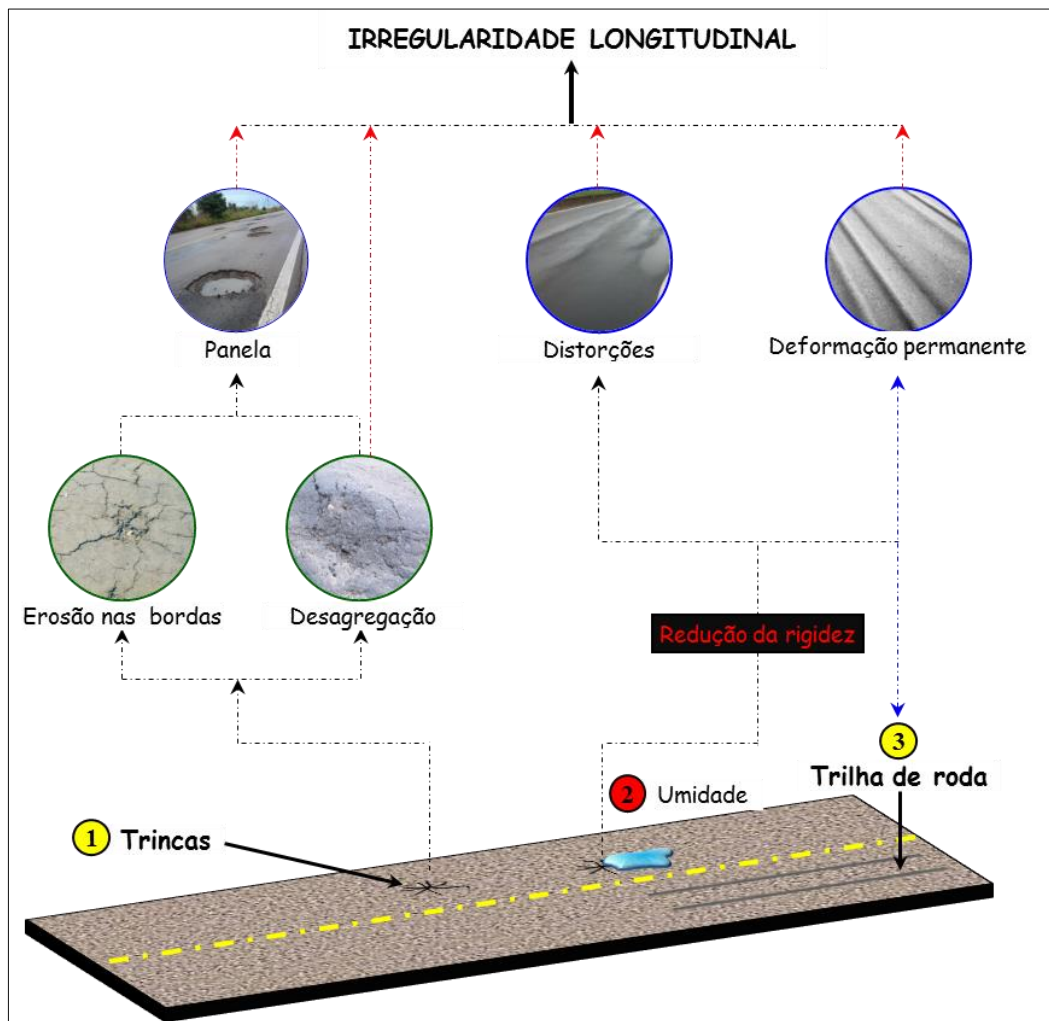
Figura 4 – Custo operacional em função da condição da via



Fonte: Adaptado de Kerali, Odoki e Stannard (2000).

Sabe-se, ainda, que as diversas patologias as quais o pavimento está sujeito tendem a promover o aumento da Irregularidade Longitudinal, pois o somatório das deformações que ocorrem em toda a estrutura do pavimento manifesta-se pelas distorções do perfil longitudinal (DNIT, 2006). A Figura 5 ilustra a contribuição negativa de cada patologia no aumento da irregularidade longitudinal.

Figura 5 – Interação entre os defeitos em rodovias pavimentadas



Fonte: Adaptado de DNIT (2006).

### 2.1.1 Abordagem dos Manuais de Restauração e Gerência do DNIT sobre Irregularidade Longitudinal

De acordo com DNIT (2006), o IRI é o índice mais frequentemente utilizado pelo DNIT, em substituição a outros índices também utilizados na Avaliação da Serventia, tais

como: Valor de Serventia Atual (VSA), Levantamento Visual Contínuo (LVC), Índice de Gravidade Global Expedito (IGGE), Índice de Estado da Superfície (IES) e Índice de Condição do Pavimento Flexível (ICPF).

Conforme DNIT (2006), a irregularidade pode ser medida em diversas escalas padronizadas e de conformidade com o equipamento de medição então utilizado. Os procedimentos estão devidamente normalizados pelo DNIT, contemplando outro índice que possui correlação com o IRI, no caso, o Quociente de Irregularidade (QI). As normas aplicadas na calibração e os instrumentos utilizados para obtenção do QI são:

- DNER–ES 173/86 – Métodos de Nível e Mira para Calibração de Sistemas Medidores de Irregularidade, tipo resposta (DNIT, 1986);
- DNER–PRO 164/94 – Calibração e Controle do Sistema Medidor de Irregularidade da Superfície do Pavimento (DNIT, 1994a);
- DNER–PRO 182/94 – Medição da Irregularidade da Superfície do Pavimento com Sistemas de Medidores (DNIT, 1994b);
- DNER–PRO – 229/94 – Manutenção de Sistemas Medidores de Irregularidade de Superfície de Pavimento – Integrador IPR/USP e *Maysmeter* (DNIT, 1994c).

Com base nas pesquisas desenvolvidas no Brasil no ano de 1992, o DNIT passou a utilizar a escala do IRI. Obteve-se uma relação entre o QI e o IRI ( $QI = 13 \times IRI$ ), haja vista que os equipamentos mencionados nas normas anteriores tinham como dado de saída o QI. A Tabela 1 apresenta os níveis de conceitos atribuíveis e relativos às condições de superfície do pavimento.

Tabela 1 – Condição de Superfície do Pavimento

Conceito	Irregularidade	
	QI(contagem./km)	IRI(m/km)
Excelente	13 – 25	1 – 1,9
Bom	25 – 35	1,9 – 2,7
Regular	35 – 45	2,7 – 3,5
Ruim	45 – 60	3,5 – 4,6
Péssimo	> 60	> 4,6

Fonte: DNIT (2006).



DNIT (2011), quanto trata de Irregularidade Longitudinal, além de mencionar os equipamentos citados em DNIT (2006), faz menção a equipamentos medidores de perfil longitudinal com ou sem contato com a superfície. No entanto, para medidores do tipo sem contato, tais como os perfilômetros a *laser*, não existe uma norma nem especificação de serviço ou procedimento oficial regulamentador até a conclusão deste trabalho.

DNIT (2011) cita o programa *Highway Development and Maintenance* (HDM-4) ao abordar limites para classificação, em termos de qualidade de IRI. Todavia, o mesmo trabalho utiliza outra tabela como referência para a classificação do IRI. A Tabela 2 mostra um comparativo entre HDM-4 e DNIT (2011) em relação ao IRI em m/km.

Tabela 2 – Comparativo HDM-4 e DNIT (2011)

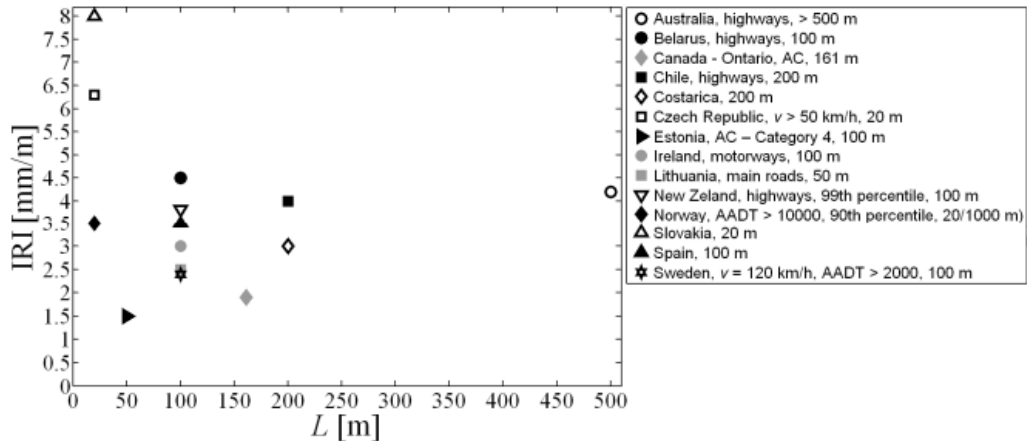
<b>Condições de Trafegabilidade</b>	<b>HDM-4 (m/km)</b>	<b>(DNIT, 2011) (m/km)</b>
Boa	$IRI \leq 2$	$IRI \leq 2,7$
Regular	$2 < IRI \leq 4$	$2,7 < IRI \leq 3,5$
Ruim	$4 \leq IRI \leq 6$	$3,5 < IRI \leq 5,5$
Péssimo	$6 < IRI$	$5,5 < IRI$

Fonte: O Autor.

Nota-se, observando as Tabelas 1 e 2, que não existe uma padronização em relação aos valores de IRI que devem ser adotados. Soma-se a isso o fato que DNIT (2013) define e padroniza os procedimentos técnicos e administrativos para recebimento de obras rodoviárias de pavimentos (novos e restaurados) atribuindo ao valor de IRI apenas o quociente do QI por 13. DNIT (2013) recomenda que, para pavimentos novos, o IRI deve ser menor que 2,3 ou 2,5 m/km; e, para pavimentos restaurados, deve ser menor que 2,7 ou 3,0 m/km, dependendo do tipo de revestimento.

Apesar da exigência dos órgãos gestores ser apenas o valor da irregularidade longitudinal, não verifica-se um consenso a respeito do valor de IRI e também qual equipamento e a velocidade que deve ser utilizada na medição. Essa questão de diferentes classes, valores, equipamentos e velocidades de medição do IRI, também é verificada em outros países. Um estudo realizado por MÚČKA (2017) abordou várias especificações de IRI adotadas em diferentes países, e a Figura 6 mostra os distintos valores de IRI adotados em outras regiões.

Figura 6 – Comparação dos valores limites de IRI para pavimentos novos ou restaurados



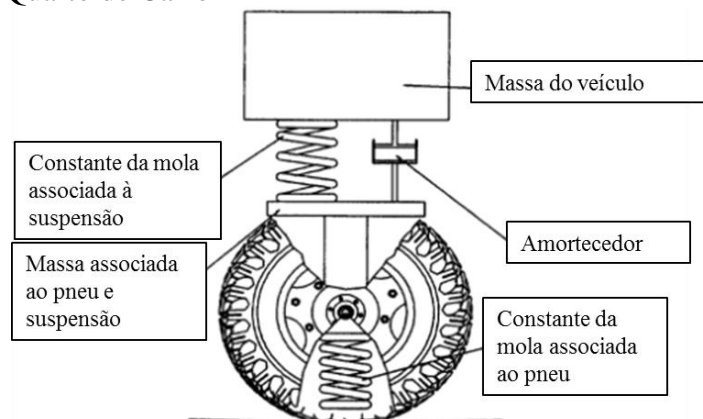
Fonte: MÚČKA (2017).

## 2.2 Irregularidade Longitudinal

A Irregularidade Longitudinal de um pavimento é comumente definida através do valor de IRI. Esse índice estatístico geralmente fornecido em m/km ou mm/m foi proposto pelo Banco Mundial em 1986 (BARELLA, 2008).

De acordo com Karamihas e Sayers (1998), o cálculo matemático do IRI é baseado na acumulação dos deslocamentos em valor absoluto, da massa superior em relação à massa inferior (em milímetros, metros ou polegadas) de um modelo de veículo, dividido pela distância percorrida (em metros, quilômetros ou milhas), quando o veículo está trafegando a uma velocidade de 80km/h. Dessa forma, o cálculo do IRI é realizado com base na medição da resposta de um veículo às condições de superfície. A Figura 7 mostra o modelo do quarto de carro, que foi o padrão proposto para ser utilizado no cálculo desse índice.

Figura 7 – Modelo Quarto de Carro



Fonte: Hirpahuanca (2016).

Barella (2008) cita que o Banco Mundial patrocinou vários programas de pesquisa nos anos 70 para conhecer os problemas dos países em desenvolvimento. Essas pesquisas realizadas principalmente por Queiroz (1981), concluíram que o pouco investimento em infraestrutura viária resultam em altos custos aos usuários dessas vias.

Segundo Hirpahuanca (2016), a irregularidade das vias foi identificada pelo Banco Mundial como fator principal para os estudos envolvendo a qualidade da estrada. Verificou-se também, por meio dos estudos de Queiroz (1981), que os dados de irregularidade de diferentes partes do mundo não poderiam ser comparados, tampouco confiáveis, haja vista que as medições foram baseadas em diferentes métodos.

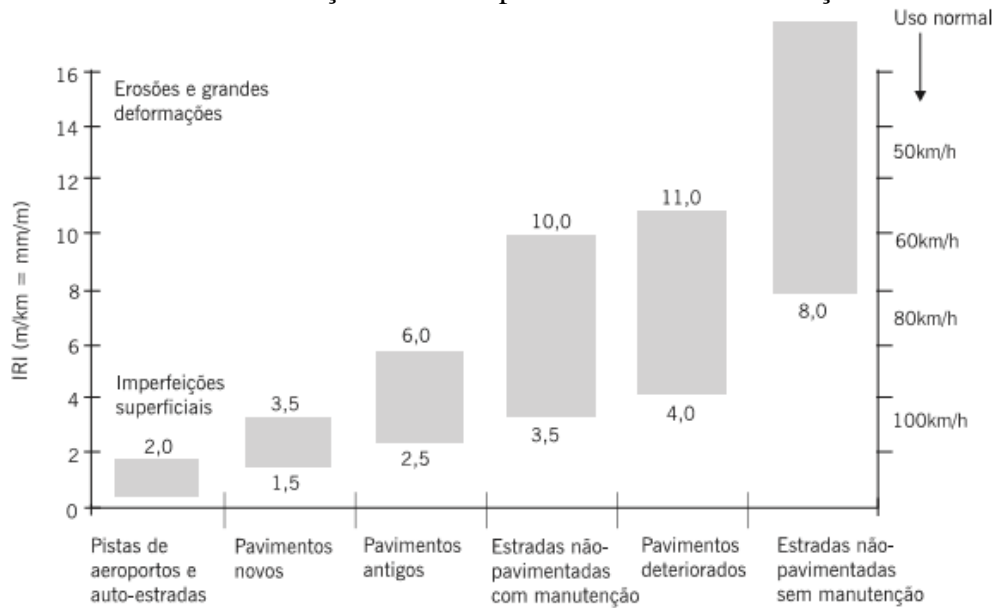
Ainda de acordo com Hirpahuanca (2016), a grande variedade de equipamentos utilizados para medir a irregularidade da superfície e os numerosos índices e escalas existentes para estabelecer os critérios de aceitação da funcionalidade da via, levaram a considerar por conveniência a adoção de um único índice, o IRI.

Pinto e Preussler (2010) mencionam que, dentre os múltiplos usos das medições de irregularidade longitudinal, podem ser destacados os seguintes: parâmetro utilizado na avaliação de pavimentos como subsídio ao diagnóstico da situação existente e à definição da solução de manutenção/restauração a ser aplicada; subsídio ao cálculo de custos de operação de veículos; controle da qualidade de execução; subsídio às decisões inerentes a sistemas de gerência de pavimentos; atualização e realimentação de modelos de previsão de desempenho de pavimentos e estimativa da serventia de pavimentos.

### ***2.2.1 Escalas e características do IRI***

Conforme Karamihas e Sayers (1998), o IRI é um indicador da condição geral do pavimento. O IRI resume as características da superfície fornecida por um sistema do tipo resposta ao impacto ou ao deslocamento vertical. Ele, também, é o índice mais apropriado quando deseja-se relacionar o custo operacional do veículo, com a qualidade do rolamento, cargas dinâmicas e estado geral da superfície. A Figura 8 mostra diferentes faixas de IRI representadas por diferentes classes de rodovias associadas a determinadas velocidades de operações.

Figura 8 – Diversas faixas de variação do IRI dependendo do caso e situação



Fonte: Bernucci *et al.* (2007).

Desse modo, o IRI tornou-se reconhecidamente como um índice geral que quantifica a irregularidade da superfície e, conforme Karamihas e Sayers (1998), esse índice é fortemente correlacionado com a maioria das respostas dos veículos. Especificamente, o IRI possui alta correlação para três tipos de variáveis de respostas dos veículos: a medida da resposta do veículos às condições do pavimento, a aceleração vertical do passageiro e a carga imposta aos pneus.

Medina e Motta (2015) afirmam que a escala do IRI pode variar de 0 a 10 (m/km) para pavimentos de concreto asfáltico ou de tratamento superficial e uma escala de 0 a 24(m/km) para estradas não pavimentadas. Estas faixas são divididas em níveis de conforto associados às velocidades máximas de operação para manter certa suavidade ao rolamento. Como exemplo, os autores indicam que uma superfície é considerada confortável quando, ao trafegar a 120km/h, o IRI medido for menor que 1,3 m/km.

Esses autores ainda afirmam que rodovias de concreto asfáltico que apresentam IRI entre 1,4 e 2,3 m/km e as de tratamento superficial com valores entre 2,0 e 3,0 m/km, indicam tipicamente um pavimento de alta qualidade.

### 2.3 Influência da irregularidade longitudinal nos custos para o usuário

Mesquita (2001) afirma que o COV é uma variável de característica muito regional, bastante influenciada pelos parâmetros das rodovias da região como rugosidade ou

irregularidade da superfície, geometria horizontal e vertical, velocidade de operação, clima e outros. O ambiente econômico regional também deve ser considerado, em particular os preços dos insumos para a produção do transporte, como combustível, pneus, mão de obra de manutenção dos veículos e peças.

Ainda segundo Mesquita (2001), também deve-se considerar os custos financeiros como preço dos veículos novos, impostos, depreciação, juros e despesas de pessoal, que são parâmetros muito regionais. Mesmo com características regionais peculiares, estabeleceu-se um modelo simplificado e com razoável precisão que represente a realidade das complexas características dos custos operacionais de veículos de uma determinada região.

Baseado em um estudo realizado pela Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes – GEIPOT, entre os anos de 1976 a 1982, financiado pelo Banco Mundial, Mesquita (2001) representou os valores médios característicos da composição dos custos operacionais de veículos para a realidade brasileira conforme mostra a Tabela 3. O custo atualizado para o ano de 2017 foi calculado aplicando o Índice Nacional de Preços ao Consumidor – INPC.

Tabela 3 – 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>
Carros	2,8	62,7	0,1748	0,51
	7,4	59,3	0,2362	0,72
	12,0	55,8	0,3214	0,96
Ônibus	2,8	72,1	0,7730	2,32
	7,4	54,7	0,9147	2,74
	12,0	43,6	1,1161	3,37
Caminhões	2,8	64,4	0,7757	2,35*
	7,4	48,7	1,0600	3,19
	12,0	37,0	1,3569	4,10
Articulados	2,8	62,3	1,6160	4,88
	7,4	39,6	2,1442	6,44

Fonte: Adaptado de Mesquita (2001).

\*COV<sub>caminhão(2017)</sub>

Mesquita (2001) obteve uma relação linear entre COV e IRI por meio do modelo matemático adotado pelo HDM-4 e foram estabelecidas as equações lineares que representam a correlação entre os custos e as condições de conservação das rodovias.

De acordo com Buttlar e Islam (2012), após a construção do pavimento, a deterioração ocorre principalmente devido à ação do tráfego e fatores oriundos do intemperismo. Essas características contribuem para aumentar a irregularidade da superfície

do pavimento, afetando assim, a segurança, o conforto e contribuindo para custos adicionais para o usuário.

Os custos do usuário ou COV correspondem aos gastos para a operação do veículo. De acordo com Moraes (2010), os componentes mais importantes considerados no COV são: o consumo de combustível, o consumo de lubrificantes, os pneus, as horas de trabalho com manutenção, a depreciação, as horas do condutor e os gastos gerais (taxas).

Dentre os custos do usuário que são afetados devido à presença de valores elevados de irregularidade longitudinal, podem-se destacar o consumo de combustível, o reparo e a manutenção dos componentes do veículo, a depreciação do veículo e os custos dos pneus.

Conforme Buttlar e Islam (2012), estudos realizados pelo Banco Mundial com o modelo HDM-4, indicam que a irregularidade presente no pavimento ocasiona aumento no consumo de combustível. Jackson (2004) *apud* Buttlar e Islam (2012) afirmou que, com base nos estudos em cinco pavimentos com condições diferentes de irregularidade longitudinal, cerca de 10% de redução de irregularidade longitudinal, elevaria a economia de combustível em torno de 1,3%, e que os motoristas preferem dirigir em pavimentos com menos irregularidades, mesmo que possa ser uma rota mais longa, aumentando assim os custos com combustível.

Ainda sobre o consumo de combustível, sabe-se que existem alguns fatores que afetam o gasto deste insumo, dentre eles o tipo de veículo, idade, tecnologia embarcada, condição e tipo de superfície do pavimento, velocidade desenvolvida, geometria da via e outros fatores. Lu (1985) reportou que a resistência ao rolamento depende da irregularidade do pavimento e que uma redução de aproximadamente 2m/km, na irregularidade, resulta em um decréscimo de 10% na resistência ao rolamento, que contribui para o aumento do rendimento do veículo (redução do consumo de combustível).

Os custos relacionados a manutenção e reparo são exigidos por causa do uso e do desgaste do veículo, incluindo também o trabalho realizado para manutenção. De acordo com o HDM-4, o efeito da irregularidade do pavimento nos custos de manutenção e reparo (MR) é insignificante para valores de IRI menores que 3m/km.

Os custos por depreciação dependem da quilometragem percorrida e idade do veículo. De acordo com Haugodegard (1994) *apud* Buttlar e Islam (2012), a maior parte dos custos de depreciação depende da idade do veículo, aproximadamente 70%.

Zaniewski (1989) desenvolveu um fator de ajuste para estimar o custo com pneus em função da condição do pavimento, e foi observado que o custo com pneus aumenta à

medida que a irregularidade longitudinal do pavimento aumenta. O mesmo autor também concluiu que o desgaste do pneu depende da aspereza do revestimento e da abrasão do agregado.

Segundo Australian Transport (2016), é preciso considerar as mudanças de tecnologias dos veículos, incluindo diferentes condições de carregamento para que seja possível obter um valor correto de COV. Para isso, foi desenvolvido um conjunto de modelos que podem ser utilizados por diferentes tipos de veículos em um fluxo de tráfego ininterrupto.

Australian Transport (2016) também desenvolveu um modelo simplificado empregando os modelos de COV do HDM-4 para gerar estimativas de custos para uma ampla gama de veículos e condições operacionais, e esses dados foram utilizados como entrada para o desenvolvimento de uma regressão múltipla. O modelo de gerado inclui, além do valor de IRI, os dados sobre velocidade desenvolvida e o peso do veículo.

## 2.4 Equipamentos utilizados na medição da Irregularidade Longitudinal

De acordo com Bernucci *et al.* (2007), a irregularidade pode ser medida por meio de levantamentos topográficos ou por equipamentos medidores do perfil longitudinal com ou sem contato com a superfície, ou ainda indiretamente avaliada por equipamentos do tipo resposta, que fornecem um somatório de desvios do eixo de um veículo em relação a suspensão. Essa terminologia se deve ao fato desses equipamentos medirem mais o efeito da irregularidade sobre os veículos e passageiros do que propriamente a irregularidade.

Ainda sobre equipamentos do tipo resposta, denominados RTRRMS (*Response-Type Road Roughness Measuring System*), esses foram por muitos anos os principais equipamentos para obtenção de dados da irregularidade dos pavimentos. Como desvantagem do método, Hirpahuanca (2016) afirma que, como o sistema do tipo resposta depende das características do veículo, é preciso que o veículo esteja em perfeito estado de conservação, principalmente para peças relacionadas à suspensão do veículo.

Para Bernucci *et al.* (2007), têm sido empregadas diversas classificações de equipamentos medidores de irregularidade, dependendo do tipo e princípio utilizado para o levantamento. Sayers (1986) aborda de modo mais específico a classificação dos medidores de irregularidade. Esses medidores podem ser agrupados em quatro classes, a saber:

- a) Classe I – Geradores de alta precisão de medição do perfil. De acordo com Hirpahuanca (2016), esses equipamentos são baseados nas medições de perfis topográficos de grande precisão. Estes métodos constituem-se como os mais

exatos que existem para determinação do IRI. Os equipamentos de classe I caracterizam-se por estabelecer a irregularidade através de medidas espaçadas a cada 250mm e cotas com uma precisão de 0,5mm. Os métodos desta classe são aqueles que produzem medidas de tão alta qualidade de modo que a reprodutibilidade do IRI não pode ser melhorada. A repetibilidade nessas condições é de cerca de 0,3 m/km em estradas pavimentadas e cerca de 0,5 m/km para todos os outros tipos de estradas. Nesta classe, enquadram-se os equipamentos tais como perfilômetro TRRL *Beam*, Nível e Mira de precisão, *Dipstick*, ROMDAS z-250, ARRB *walking profilometer*.

- b) Classe II – Medição sem contato com a superfície. Nesta classe, incluem-se os outros métodos nos quais a irregularidade é determinada através da medição do perfil longitudinal, mas com menor acurácia que a classe I. Os equipamentos pertencentes a essa classe são perfilômetros de alta velocidade, como o APL *Trailer* e o *GMRtype Inertial Profilometer*. Hirpahuanca (2016) afirma que tanto os métodos de classe I, como os de classe II, determinam a irregularidade em termos de IRI fazendo uso de programas computacionais baseados em algoritmos matemáticos.
- c) Classe III – Geradores de perfis simples ou equipamentos do tipo resposta. Nesta classe, enquadram-se os métodos que recorrem ao uso de equações de correlação para a estimação do valor de IRI. Estes métodos, também denominados tipo resposta, estabelecem a irregularidade baseados na determinação do movimento relativo em que o sistema de suspensão do veículo é submetido ao trafegar sobre o pavimento. Para Hirpahuanca (2016), as medições efetuadas pelo método classe III dependem das características dinâmicas dos veículos, para proporcionar parâmetros de irregularidade que possam correlacionar-se com o IRI. No entanto, as propriedades dinâmicas de cada veículo são particulares e variam com o tempo, portanto as medições devem ser correlacionadas com o IRI mediante uma equação de calibração, que deve ser obtida experimentalmente e especificamente para o veículo utilizado. Os equipamentos pertencentes a esta classe são: o *Roadmaster*, ROMDAS, *Roughmeter*, TRL *Bump Integrator*, *Rolling straight edge*, *Meysmeter* e outros.
- d) Classe IV – Avaliação Subjetiva. De acordo com Hirpahuanca (2016) e Douangphachanh (2014), existem situações que os dados de irregularidade não necessitam de grande precisão ou simplesmente não é possível obter dados



precisos. Nesses casos, pode-se recorrer a uma avaliação subjetiva, mediante experiência prévia do avaliador e uma inspeção visual. Além da inspeção visual, também pode ser adotado um sistema de classificação baseado em código, no qual são atribuídas notas para classificar a condição da superfície do pavimento. No Brasil, este método é designado como Valor de Serventia Atual (VSA).

A Figura 9 mostra alguns dos equipamentos mencionados. A Tabela 4 mostra as vantagens e desvantagens de cada classe de equipamentos.

Figura 9 – Exemplos de equipamentos medidores de IRI



Fonte: Adaptado de Douangphachanh (2014).

Tabela 4 – Vantagens e desvantagens das classes de equipamentos medidores de IRI

Classe	Vantagens	Desvantagens
I e II	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispositivos sofisticados;</li> <li>• Geradores de perfis manuais não são tão caros;</li> <li>• Rápidos, para geradores de perfis automáticos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geradores de perfis automáticos são caros para se obter, operar e manter;</li> <li>• Não são frequentemente implementados devido aos custos (automático) e velocidade (manual);</li> <li>• Obtenção dos dados pode ser demorada quando for de alta precisão;</li> <li>• Componentes pesados e necessidade de calibração antes da implantação.</li> </ul>
III	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custo relativamente baixo;</li> <li>• Rápido e acurácia moderada;</li> <li>• Alta performance;</li> <li>• Alta adequação entre os instrumentos de medição de irregularidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envolve alguns custos para desenvolvimento;</li> <li>• Para calibração e configurações iniciais envolve trabalho exaustivo.</li> </ul>
IV	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo custo;</li> <li>• Pode ser implementada regularmente, quando a área de estudo não for grande;</li> <li>• Não precisa de ferramentas ou equipamentos dispendiosos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resultados podem ser imprecisos;</li> <li>• Trabalho intenso com bastante tempo consumido acarretando em baixo rendimento e adequação.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Douangphachanh (2014).

Estudos conduzidos por Bennett (2008) produziram algumas características em relação a custos e desempenho, assim como um *ranking* para avaliar os diferentes tipos de instrumentos aplicados em um SGP. As Tabelas 5 e 6 mostram os resultados desse estudo.

Tabela 5 – Matriz de custos e performance operacional

		Performance Operacional				
Custo Global do Equipamento	Escala	1 (Baixa Performance)	2	3	4	5 (Alta Performance)
	1 (Alto Custo)			<i>Skid Resistance Dynamic - Vehicle</i>	<i>Imaging for Surface Distress</i>	
	2			<i>Ground Penetrating Radar – Dynamic; FWD - Trailer</i>	<i>Macrotextura – Dinâmico (Alta Velocidade); Precision INU; Roughness – Classe I (laser)</i>	

Escala	1 (Baixa Performance)	2	3	4	5 (Alta Performance)
3			<i>Deflection Beams;</i> <i>FWD – Portátil;</i> <i>Ground Penetrating Radar – Estático;</i> <i>Skid Resistance – Trailer Dinâmico</i>	GPS com INU; Macrotextura – Dinâmico (Baixa Velocidade); <i>Rut Depth Profilers;</i> <i>Roughness – Classe II</i>	
4		<i>Roughness – Classe IV</i>	<i>Roughness – Classe I (Manual);</i> <i>Skid Resistance – Estático</i>	<i>Video Logging;</i> <i>Roughness – Classe III</i>	GPS
5(Baixo Custo)			Macrotextura - Estático		<i>Digital DMI</i>

Fonte: Adaptado de Douangphachanh (2014).

Tabela 6 – *Ranking* dos equipamentos

Equipamento	Pontuação ( <i>Ranking</i> )
<i>Digital DMI</i>	4,62
GPS	4,29
GPS com INU	4,01
Macrotextura – Dinâmico (Baixa Velocidade)	3,88
<i>Video Logging</i>	3,82
<i>Geometry Precision INU</i>	3,76
<i>Roughness – Classe III</i>	3,60
Macrotextura - Estático	3,57
Macrotextura – Dinâmico (Alta Velocidade)	3,51
<i>Roughness – Classe I (manual)</i>	3,50
<i>Roughness – Classe II</i>	3,41
<i>Rut Depth Profilers</i>	3,41
<i>Surface Distress Imaging</i>	3,31
<i>Roughness – Classe IV</i>	3,30
<i>Skid Resistance – Dinâmico (Trailer)</i>	3,24
<i>Skid Resistance – Estático</i>	3,12
<i>Deflections Beams</i>	3,07
<i>Roughness – Classe I laser</i>	2,91
FWD portátil	2,71
<i>Ground Penetration Radar – Dinâmico</i>	2,69
<i>Ground Penetration Radar – Estático</i>	2,61
<i>Trailer FWD</i>	2,55
<i>Skid Resistance – Dinâmico (veículo)</i>	2,23

Fonte: Adaptado de Douangphachanh (2014).

## 2.5 Utilização do RMSVA para cálculo da Irregularidade Longitudinal

De acordo com Bisconsini (2016), o RMSVA é uma medida estatística da magnitude de uma quantidade variável. Os valores de RMSVA são calculados de acordo com a equação 1.

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

em que:

RMSVA = Raiz da Média Quadrática da Aceleração Vertical(m/s<sup>2</sup>);

$a_z$  = Aceleração Vertical (m/s<sup>2</sup>);

$n$  = número de dados.

A utilização de valores de RMSVA para cálculo do IRI ou para fornecer índices relacionados ao conforto deu-se no final da década de 1970, quando W. R. Hudson e outros pesquisadores realizaram vários estudos baseados em equações de calibração de sistemas medidores do tipo resposta e índices de irregularidade obtidos por essas medidas estatísticas (BISCONSINI, 2016).

Notou-se que, devido ao advento da tecnologia e o uso de *smartphones* para mensuração ou estimação da irregularidade longitudinal, continuou-se utilizando valores de RMS para correlacioná-los com índices de irregularidade, principalmente pela influência do sistema de suspensão dos veículos. Um exemplo dessa aplicação foi o aplicativo *Roadroid*, que utilizou valores de RMS para correlacionar com medições realizadas com o perfilômetro a *laser*.

Bisconsini (2016) afirma que, em estudos realizados no ano de 2014, o coeficiente de correlação de Pearson entre o RMS dos sinais de aceleração vertical e o IRI obtido por um *Automatic Road Analyser* (ARAN) variaram de 0,71 a 0,94.

No Brasil, também existiram experimentos que testaram alguns índices estatísticos buscando correlação com o QI. Queiroz (1981) utilizou valores de RMS geométrico para estimar o QI. A equação 2 mostra o cálculo do QI em função do RMS com bases de 1,0 e 2,5 metros de comprimento.

$$QI = 5,54 + 6,17 \times RMS_{1,0} + 19,38 \times RMS_{2,5} \quad (2)$$

## 2.6 Smartphones e sensores móveis

Grande parte dos *smartphones* está equipada com sensores, tais como acelerômetros e giroscópios. Esses sensores são capazes de atuar nos três eixos conforme mostra a Figura 10.

Figura 10 – Sistema de coordenadas de um *smartphone*

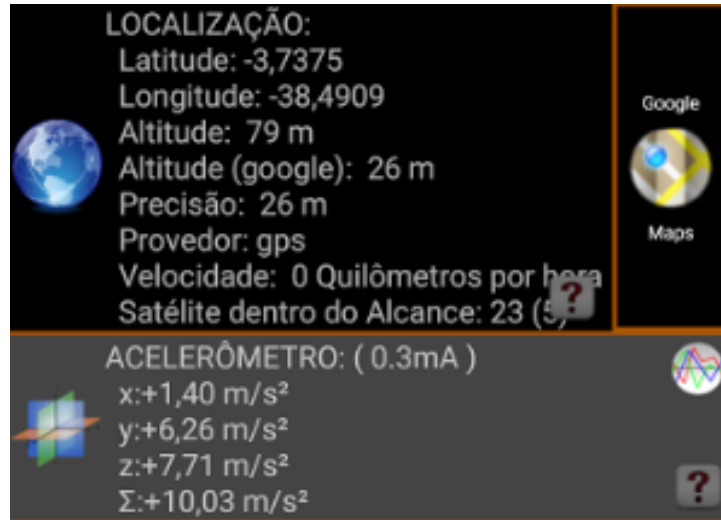


Fonte: Bisconsini (2016).

Para o propósito deste trabalho, apenas o acelerômetro e o receptor GPS serão utilizados. O acelerômetro pode monitorar a variação da aceleração de um dispositivo ao longo dos três eixos. Esse sensor pode ser utilizado como uma medida inercial de velocidade e posição, inclinação ou orientação tendo como referência a aceleração da gravidade e vibração. Ramos (2017) menciona ainda que a obtenção dos dados da aceleração da gravidade é vulnerável ao posicionamento dos sensores durante as medições. A unidade de medida é comumente fornecida em  $m/s^2$ . O receptor GPS irá fornecer os dados de latitude e longitude vinculados aos valores da aceleração vertical.

A Figura 11 mostra a tela de um aplicativo desenvolvido para *smartphone* que fornece os sinais de aceleração e dados de GPS. É possível captar os sinais de aceleração vertical decorrentes das irregularidades dos pavimentos, juntamente com velocidade e posição dos dados coletados.

Figura 11 – Exemplo de dados dos sensores do *smartphone*



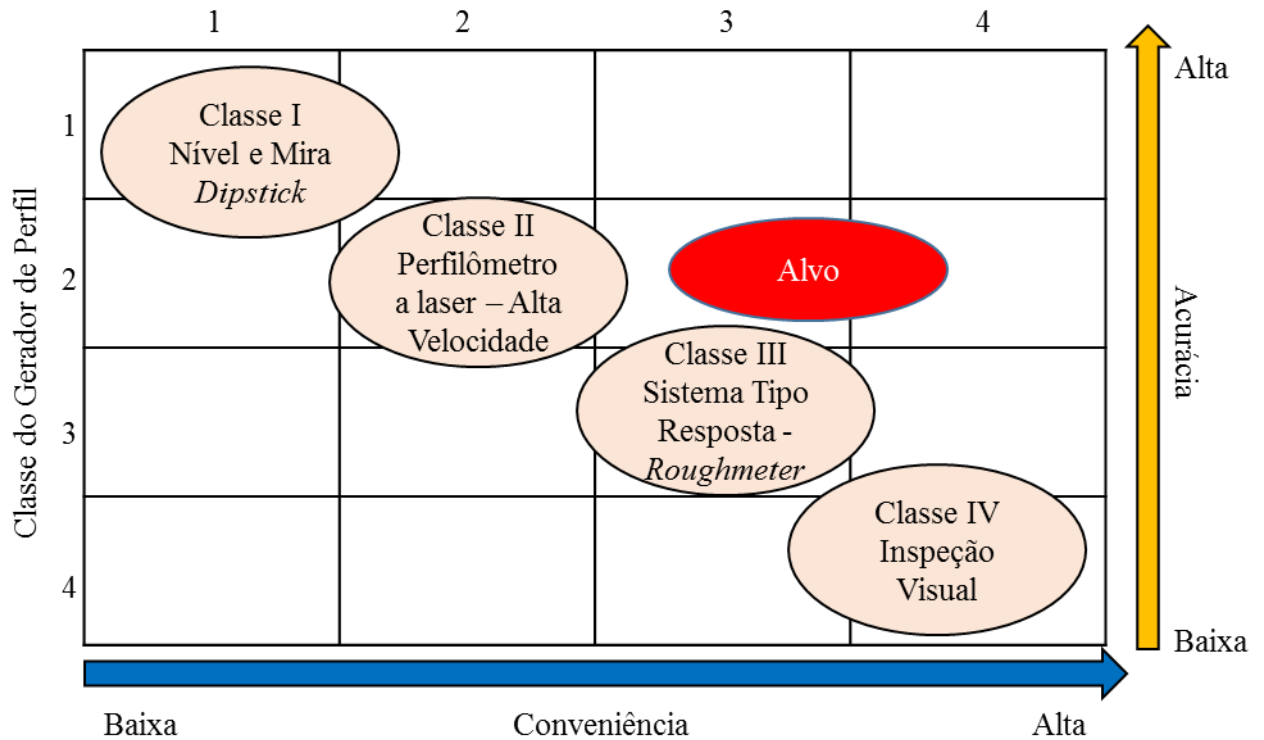
Fonte: O Autor.

## 2.7 Utilização de *smartphones* e sensores móveis na avaliação funcional dos pavimentos

De acordo com Bisconsini (2016), alguns pesquisadores têm estudado o uso de *smartphones* para avaliação funcional dos pavimentos, principalmente na determinação da irregularidade longitudinal, devido sobretudo ao seu baixo custo, fácil operação e produtividade.

Para o mesmo autor, a utilização de *smartphones* para avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos pode ser vista como um sistema de medição do tipo resposta, apesar de não funcionar como um medidor convencional da classe, que acumula os deslocamentos entre a carroceria e o eixo traseiro do veículo, mas mede as acelerações verticais por meio de um *smartphone* fixado internamente. Por necessitar de um processo de calibração por correlação, o sistema com *smartphones* pode ser classificado como pertencente à Classe III. TOMIYAMA *et al.* (2012) classificam a utilização deste dispositivo em função da classe do gerador do perfil e da sua conveniência de acordo com a Figura 12. O “alvo” indicado na Figura 12 se refere ao objetivo dos pesquisadores supracitados, ou seja, a obtenção de um sistema com maior acurácia e conveniência possível, mas ainda pertencente à Classe III.

Figura 12 – Classificação dos *smartphones* com relação aos demais equipamentos de medição de irregularidade



Fonte: Adaptado de TOMIYAMA *et al.* (2012).

Conforme mencionado, uma das desvantagens de um sistema do tipo resposta é que ele precisa de uma calibração prévia, chamada calibração por correlação, com o objetivo de determinar, para cada velocidade operacional, a relação entre o valor do índice de irregularidade e a quantidade de deslocamentos verticais por distância percorrida medidos pelo equipamento. Devido a esse processo, os valores coletados por um equipamento do tipo resposta não medem o perfil real do pavimento, mas uma resposta em termos de deslocamentos que se relacionam com a irregularidade dos pavimentos (BISCONSINI, 2016).

Forslof (2013) e Bisconsini (2016) comentam que existe descrença em torno da aplicação de um medidor do tipo resposta, como no caso dos *smartphones*, principalmente quando comparado com os perfilômetros (classe I ou II). No entanto, os mesmos autores ressaltam que os *smartphones* podem fornecer atualizações sobre a condição funcional do pavimento, incluindo a irregularidade longitudinal em um curto espaço de tempo, em relação a outros métodos, que, devido ao custo, são utilizados com pouca frequência ou, mesmo, deixam de ser utilizados.

Nesse sentido, devem-se adequar os diferentes tipos de equipamentos de avaliação da irregularidade longitudinal de acordo com o tipo de informação requerida, o tempo e meios

os disponíveis. Na realidade, um equipamento não impede o uso do outro. É preciso que haja a complementação do uso de sistemas que permitam a geração de informações significativas para a análise do desempenho dos pavimentos (BISCONSINI, 2016).

## **2.8 Pesquisas relacionadas a utilização de *smartphones* e sensores móveis para estimar a condição do pavimento**

Segundo Douangphachanh (2014), não existem muitos estudos que exploram diretamente o uso do *smartphone* para estimar o IRI. Estudos anteriores deste trabalho mostram que há bastante interesse nos estudos para detecção de buracos ou panelas utilizando sensores móveis, a maioria busca identificar e localizar essas anomalias em vez de estimar a real condição do pavimento, particularmente em termos de IRI.

Um exemplo dessa aplicação é o *StreetBump*. Esse aplicativo foi desenvolvido para que os usuários contribuam mapeando buracos e outras deformações nas ruas de Boston. Os dados coletados a partir do acelerômetro e do GPS presentes no *smartphone*, são enviados a um servidor gerido pelo departamento de obras públicas de Boston (BISCONSINI, 2016).

Além do *StreetBump*, outro aplicativo desenvolvido para detecção de buracos foi o *BumpRecorder*. Esse aplicativo foi desenvolvido por pesquisadores japoneses que funciona de maneira análoga ao *StreetBump*. Um aplicativo desenvolvido para estimar a condição funcional do pavimento baseado em dados do acelerômetro do *smartphone* é o *Roadlab*. Este aplicativo, diferentemente dos demais citados, busca estimar a condição da via a partir de dados do acelerômetro utilizando valores de *Root Mean Square* (Raiz da Média Quadrática – RMS).

Um trabalho que foi utilizado para avaliar a condição de irregularidade de uma via, foi o de González *et al.* (2008). A partir de informações de acelerômetros, esses autores chegaram à conclusão que a condição de irregularidade pode ser estimada a partir de dados de aceleração oriunda desses sensores. Eriksson *et al.* (2008) desenvolveram um sistema denominado *Pothole Patrol* que trabalha por reconhecimento de padrões para identificar buracos.

Bisconsini (2016) e Douangphachanh (2014) afirmam que outras pesquisas também foram realizadas com o intuito de localizar buracos e outros defeitos em pavimentos urbanos, tais como as de Tai, Hsu e Chan (2010), Mednis *et al.* (2011) e Strazdins *et al.* (2011). Recentemente, após estudos de González *et al.* (2008), alguns pesquisadores têm estudado o uso de *smartphones* para avaliação da condição funcional do pavimento, devido



principalmente ao seu baixo custo, fácil operação e alta produtividade. Hanson e Cameron (2012), Forslof (2013), Alessandrini *et al.* (2014), Buttlar e Islam (2014), Hanson *et al.* (2014) e Wang e Guo (2016) são exemplos de trabalhos voltados para tal fim.

Forslof (2013) desenvolveu o *Roadroid* e afirma que para utilizá-lo é necessário fixar o *smartphone* no para-brisas de um veículo utilizando um suporte adequado. Após a calibração, o veículo percorre a via a ser analisada de forma a inferir sobre a condição funcional do pavimento. Os resultados dessa estimativa podem ser apresentados em mapas. Na Figura 13, são mostrados exemplos do *BumpRecorder*, desenvolvido por Yagi (2016), e o *Roadroid*, respectivamente.

Figura 13 – Exemplo dos aplicativos *BumpRecorder* (a) e *Roadroid* (b)



Fonte: Douangphachanh (2014).

De acordo com Douangphachanh (2014), apesar desses aplicativos serem inovadores e promissores, ainda existem algumas limitações para utilização. As principais são:

- a) muitos aplicativos estão buscando apenas identificar e localizar buracos, assim como classificá-los quanto à sua degradação. No entanto, poucos estão sendo desenvolvidos para avaliar a condição funcional dos pavimentos;
- b) para grande parte dos aplicativos, o *smartphone* precisa ser fixado com um suporte especial no para-brisas de um veículo;
- c) calibrações repetitivas precisam ser realizadas antes da utilização para fornecer valores condizentes com a condição funcional da via.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são descritos os procedimentos para a coleta e processamento dos dados, as etapas para a obtenção do modelo para o cálculo do Índice Internacional de Irregularidade (IRI) por meio de *smartphones*, os equipamentos utilizados para a coleta dos dados da irregularidade longitudinal em diversos pavimentos rodoviários e o processamento dos dados para a análise comparativa com os índices de referência (Nível e Mira, perfilômetro a *laser*, os aplicativos disponíveis no mercado e avaliação subjetiva).

#### 3.1 Resumo do método

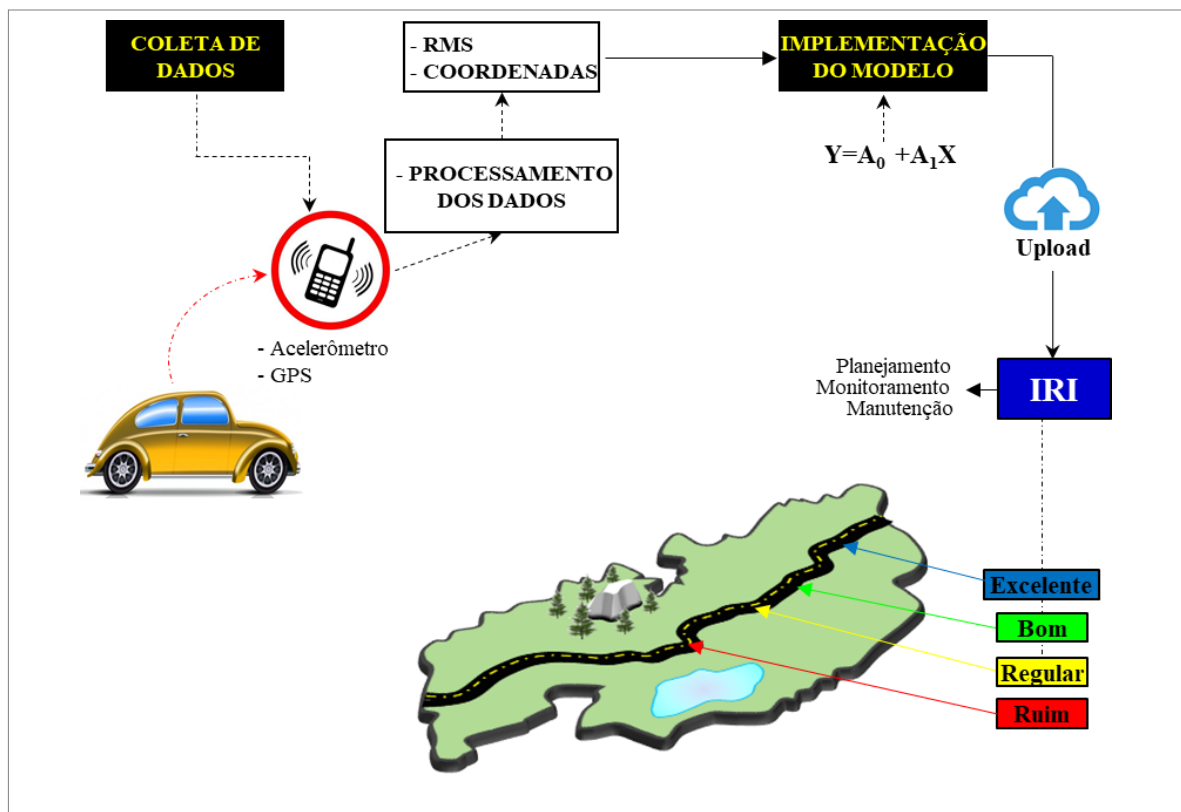
As etapas cumpridas ao longo deste trabalho foram:

- a) utilização de dados disponíveis em Bisconsini (2016), a fim de obter o modelo que relacione valores de RMSVA com IRI;
- b) obtenção de sinais de aceleração verticais medidos com dois *smartphones*, um executando o SmartIRI e outro executando um aplicativo de referência (*Roadlab*). A calibração inicial do sistema será descrito no capítulo posterior. Na etapa de obtenção de sinais, o *smartphone* foi fixado ao para-brisa do veículo e percorreu o trecho a velocidades entre 20 a 120km/h, para analisar o efeito da variação da velocidade no modelo proposto;
- c) organização de dados em planilhas eletrônicas e posterior cálculo do RMSVA para o eixo Y. Ainda na etapa inicial optou-se pelo próprio aplicativo efetuar o cálculo do IRI com base no modelo proposto, eliminando assim, a etapa de calcular o RMSVA por meio de planilhas eletrônicas;
- d) cálculo do IRI por meio do modelo matemático proposto e comparação com os valores de referência obtidos por perfilômetros a *laser* e o aplicativo já disponível no mercado (*Roadlab*). Por meio de gráficos de dispersão, analisou-se a relação entre os dados de IRI gerados pelos métodos analisados.
- e) embarcar em um *smartphone* o algoritmo obtido nos passos anteriores de modo que o próprio dispositivo fixado no para-brisas de um veículo forneça os valores de IRI, assim como a velocidade e a localização do levantamento.

#### 3.2 Etapas do processo metodológico

Realizado o levantamento da irregularidade longitudinal com o SmartIRI caracterizando o processo de coleta de dados, essas informações serão analisadas, calculadas e estimadas em tempo real, sendo exibidas aos usuários no próprio *smartphone* ou em um computador. Essas informações poderão ser utilizadas para fins de planejamento, manutenção e monitoramento dos trechos analisados. A Figura 14 mostra as etapas utilizadas no processo de aquisição, processamento e análise dos dados.

Figura 14 – Etapas do processo metodológico



Fonte: O Autor.

Ainda sobre a Figura 14, após efetuado o *download* do aplicativo SmartIRI, é necessário que o celular seja fixado no para-brisa do veículo e a medição seja iniciada com o veículo em movimento preferencialmente com velocidade superior a 40 km/h. O próprio *smartphone* faz o processamento dos dados por meio de valores de RMS e coordenadas oriundas do GPS a cada 100 metros percorridos. Esses dados coletados foram implementados em um modelo elaborado pelo autor com objetivo de determinar o valor de IRI e sua respectiva localização no trecho em que foi realizado o levantamento. Esses dados podem ser analisados no próprio *smartphone* ou realizando o *upload* dos arquivos gerados para uma análise mais detalhada.

### 3.3 Obtenção do modelo para o cálculo da irregularidade longitudinal

Por meio dos dados disponíveis em Bisconsini (2016), foi possível elaborar um modelo para efetuar o cálculo da irregularidade longitudinal, em termos de Índice Internacional de Irregularidade (*International Roughness Index* – IRI). Isso foi possível devido a elevados valores de  $R^2$  alcançados nas relações entre Velocidade e Raiz da Média Quadrática (*Root Mean Square* – RMS), e entre IRI e RMSVA.

O *software* Minitab foi utilizado no auxílio à obtenção do modelo. Os parâmetros verificados como premissa foram o  $R^2$  ajustado (*R-sq adj*), o P-Valor (*P-Value*) e o Fator de Inflação da Variância (*Variance Inflation Factor* - VIF). No tópico seguinte serão apresentados o método de coleta dos dados com um *smartphone*, os aplicativos utilizados e as condições para o posterior processamento dos dados.

#### 3.3.1 Equipamentos

Para a coleta dos dados, foram utilizados três modelos de *smartphones*. Tratam-se dos *smartphones* modelos Moto X Play e Moto X, da marca Motorola. O terceiro modelo foi o *smartphone* Galaxy S4 mini, da marca Samsung. Todos os modelos apresentaram bom funcionamento do GPS (no mínimo 4 satélites) aumentando a confiabilidade na localização dos dados coletados.

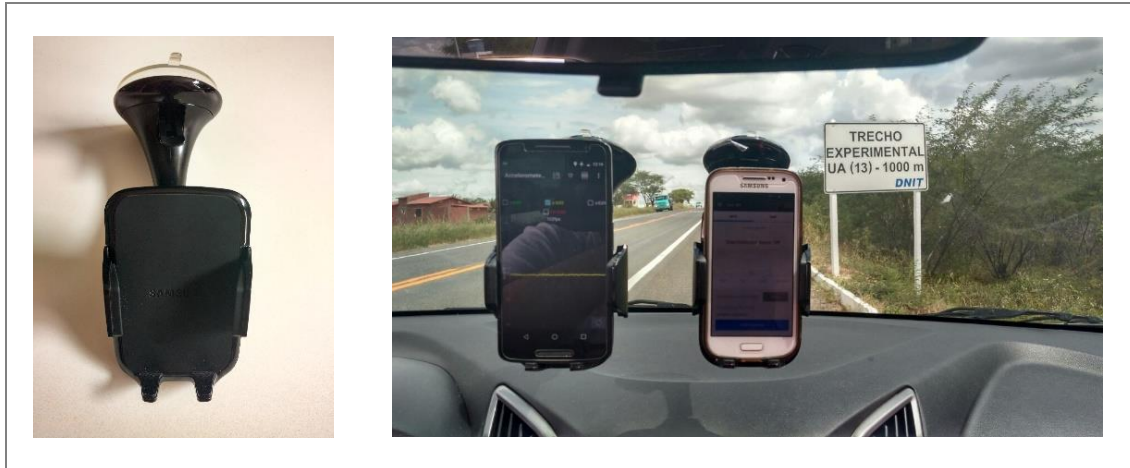
Os três modelos possuem o acelerômetro, sensor responsável pela captação dos dados de aceleração, e foram configurados para trabalhar em uma taxa de aquisição de 100Hz. Essa taxa de aquisição de dados foi escolhida para que o aplicativo fosse utilizado em celulares com restrições de *hardware*, ou seja, dispositivos que não suportam taxas de aquisições mais elevadas. No entanto, essa limitação pode ser prejudicial ao sistema, pois alguns valores de irregularidade podem não ser detectados pelo sistema.

Em relação ao suporte veicular para *smartphones*, testes preliminares foram efetuados com alguns modelos de baixo custo disponíveis no mercado. No entanto, percebeu-se que esses modelos permitiam a vibração excessiva dos *smartphones* durante a medição com o veículo em movimento, principalmente no Moto X Play, aparelho que possui a maior dimensão, com conseqüente perda de fidelidade dos dados adquiridos.

Devido a esse problema, Forslof (2013) recomenda o modelo *Vehicle Dock*, da marca Samsung. Esse equipamento forneceu bom apoio para os três tipos de modelos de

*smartphones*, o que contribuiu para mitigar erros oriundos de vibração excessiva. A Figura 15 mostra o suporte veicular utilizado e a orientação que o *smartphone* deve ser colocado para a coleta de dados.

Figura 15 – Suporte e posição do aparelho no veículo



Fonte: O Autor.

Em relação ao veículo utilizado para coleta de dados, foi utilizado um veículo da marca Hyundai, modelo HB 20, motor 1.6, ano 2016. Inspeções no sistema de suspensão do veículo foram realizadas de forma a minimizar os erros que poderiam afetar a medição. Os pneus foram calibrados em 32 psi, conforme orienta o fabricante. Quanto ao volume do tanque de combustível, não foi possível manter uma taxa constante de capacidade volumétrica. A Figura 16 mostra o veículo utilizado no experimento.

Figura 16 – Veículo utilizado na coleta de dados



Fonte: O Autor.

A coleta também foi efetuada com um, dois ou três passageiros presentes no veículo. Para as duas variáveis citadas anteriormente, quantidade de combustível e número de passageiros, assim como em Bisconsini (2016), não foram analisadas suas influências sobre os resultados obtidos.

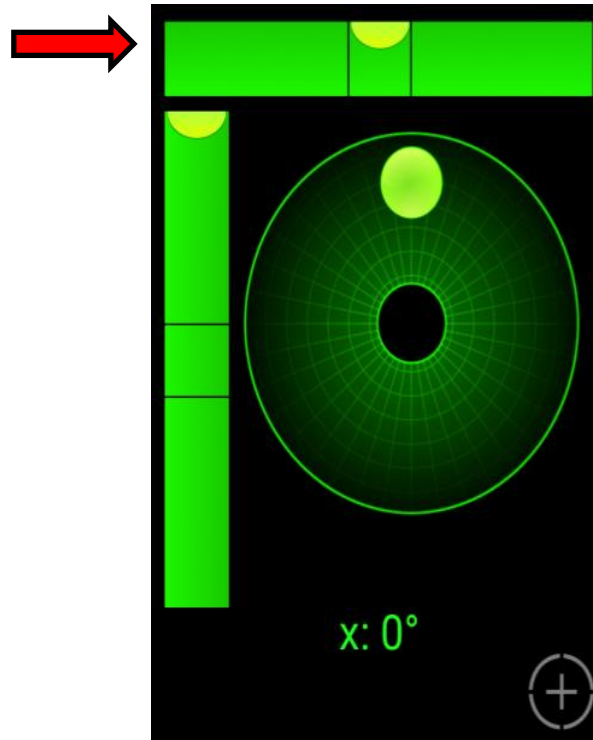
### 3.3.2 Coleta de dados

Inicialmente, desenvolveu-se para a coleta de dados apenas um aplicativo para medir dados de aceleração vertical. Nessa fase inicial, optou-se por não discretizar os valores de IRI a cada 100 m, e sim, calcular o IRI médio dos trechos estudados sem segmentá-los. A escolha em segmentar os trechos a cada 100 m foi feita para facilitar a visualização de segmentos principalmente quando possuem características distintas de superfície em um curto espaço.

As configurações necessárias foram a remoção do valor da aceleração da gravidade no eixo Y ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) e definição do valor da taxa de aquisição de dados de 100Hz. Após efetuada a medição do trecho com os dois *smartphones*, um executando o Aplicativo de Referência e outro executando o SmartIRI. Os dados já eram automaticamente processados por ambos os aplicativos sendo posteriormente feita uma planilha para comparar os valores de IRI obtidos em cada trecho analisado.

O outro aplicativo utilizado foi o *Nivel Galaxy*. Este aplicativo foi utilizado para calibrar a orientação do *smartphone*. Como o eixo Y foi utilizado para coleta de dados, é necessário que os eixos X e Z estejam zerados, e isso foi executado por meio da utilização deste aplicativo antes do início da medição. A Figura 17 mostra a tela de exibição do aplicativo para calibração. É necessário que a bolha do sentido horizontal esteja situada entre as marcações. Na versão final do aplicativo SmartIRI, não foi mais necessária a utilização deste aplicativo, pois essa versão já contempla, dentre suas funcionalidades, calibrar o *smartphone* no sentido do eixo Y.

Figura 17 – Tela do aplicativo para nivelamento do aparelho



Fonte: O Autor.

### 3.4 Processamento dos dados de irregularidade longitudinal

Conforme apresentado no tópico anterior, ambos os aplicativos realizaram o processamento dos dados no próprio dispositivo. Quanto ao SmartIRI, após calibrar o *smartphone* na posição vertical e atingir a velocidade de medição (de 60 a 80km/h), iniciava-se a medição.

Geralmente, os trechos percorridos foram de 1km de extensão. Após percorrê-lo, encerrava-se a medição, que ficava gravada na memória do dispositivo, necessitando apenas do envio do arquivo, via correio eletrônico, para posterior análise dos dados.

O cálculo do IRI foi elaborado com base em valores de RMS e inseridos em um modelo matemático elaborado pelo próprio autor. Na versão final do aplicativo, foi possível discretizar os valores de IRI a cada 100 m, sendo que outras informações foram inseridas, tais como hora da medição, velocidade média, condição funcional de acordo com a escala adotada, latitude e longitude dos segmentos, distância percorrida, valores de RMS e de IRI. A Figura 18 mostra um exemplo de resultado gerado pelo SmartIRI.

Figura 18 – Resultado do Arquivo de Medição pelo SmartIRI

HORA	VEL. MEDIA	CLASSIFICACAO	LAT_INICIO	LNG_INICIO	LAT_FINAL	LNG_FINAL	DISTANCIA	RMS	IRI
8:51:22	54.66	BOM	-3.784120301	-38.5189661	-3.783941584	-38.51991746	107	0.868	3.529
8:51:30	55.05	BOM	-3.78391547	-38.52005433	-3.783760301	-38.52086638	107	0.771	3.177
8:51:37	52.53	BOM	-3.783735194	-38.52099528	-3.783588915	-38.5217887	102	0.703	3.013
8:51:44	53.65	BOM	-3.783564153	-38.52189937	-3.783411209	-38.52269403	104	0.721	3.046
8:51:51	56.55	BOM	-3.783385094	-38.52283191	-3.783219094	-38.5236689	110	0.631	2.649
8:51:58	57.38	BOM	-3.783191182	-38.52381193	-3.783033829	-38.52465547	111	0.722	2.939
8:52:05	57.02	BOM	-3.783009438	-38.52479309	-3.782968223	-38.52564886	110	0.567	2.419
8:52:12	58.59	BOM	-3.78298496	-38.52579458	-3.78323192	-38.52663582	113	0.717	2.887
8:52:19	55.94	BOM	-3.783292751	-38.52676449	-3.783669331	-38.52750534	108	0.805	3.266
8:52:26	55.25	REGULAR	-3.783728719	-38.5276296	-3.783983211	-38.52841731	107	1.028	4.068

Fonte: O Autor.

O SmartIRI também possui como um dos resultados um arquivo no formato .kml, que permite ao usuário a visualização do trecho monitorado por meio de mapas, segmentando o trecho a cada 100m em uma escala de cores que obedece aos seguintes parâmetros de acordo com a Tabela 7. O tutorial de utilização do SmartIRI encontra-se no Apêndice A deste trabalho.

Tabela 7 – Classificação proposta pelo SmartIRI

Intervalos de IRI	Classificação	Cores
$0 < \text{IRI (m/km)} < 2$	Excelente	verde escuro
$2 \leq \text{IRI (m/km)} < 4$	Bom	verde claro
$4 \leq \text{IRI (m/km)} < 6$	Regular	laranja
$6 \leq \text{IRI (m/km)}$	Ruim	vermelho

Fonte: O Autor.

### 3.5 Trechos analisados na calibração do sistema

A seleção dos trechos que foram analisados teve como critério de escolha segmentos que foram monitorados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), de modo a facilitar a aquisição dos dados necessários (Anexo A) para a correlação do sistema. Trechos que não possuíam dados sobre irregularidade longitudinal foram calibrados e estudados com base em avaliação subjetiva por meio de Valor de Serventia Atual (VSA), e também com outros aplicativos disponíveis no mercado para avaliação funcional de pavimentos.

Douangphachanh (2014) efetuou a calibração em seus veículos experimentais, percorrendo no máximo 110 km. Para este trabalho, em relação à calibração, foram percorridos 165 km em um total de 98 levantamentos para efetuar a calibração do sistema.



Para alguns trechos, foram efetuadas mais de uma medição em velocidades distintas para conferir a repetibilidade dos dados.

Os trechos percorridos estão localizados no estado do Ceará, mais precisamente situados na cidade de Fortaleza, região metropolitana e região do sertão central. Estes trechos contemplaram os diversos tipos e condições dos pavimentos, foram analisados trechos com altos níveis de irregularidade a trechos com excelentes condições de rolamento de forma a melhorar a calibração do sistema. Todos os levantamentos foram realizados nos períodos manhã ou tarde, durante o segundo semestre do ano de 2017 sempre com condições climáticas favoráveis.

### 3.6 Classificação e conceito proposto pelo aplicativo

A classificação proposta pelo SmartIRI assemelha-se à proposta pelo HDM-4 (PIARC, 2010). No entanto, uma nova classe foi criada pelo autor deste trabalho, denominada excelente, e assim transpondo as classes subsequentes para o limite posterior, fazendo com que a classe regular do HDM-4 fosse classificada como bom no SmartIRI. A Tabela 8 mostra o comparativo entre as classificações.

Tabela 8 – Classificação das condições de trafegabilidade proposta para o SmartIRI

<b>Condições de Trafegabilidade</b>	<b>HDM-4 (m/km)</b>	<b>Condições de Trafegabilidade</b>	<b>SmartIRI (m/km)</b>
Boa	$IRI \leq 2$	Excelente	$0 < IRI < 2$
Regular	$2 < IRI \leq 4$	Boa	$2 \leq IRI < 4$
Ruim	$4 \leq IRI \leq 6$	Regular	$4 \leq IRI < 6$
Péssimo	$6 < IRI$	Ruim	$6 \leq IRI$

Fonte: O Autor.

Essa transposição das classes foi necessária devido ao fato do SmartIRI funcionar como um equipamento do tipo resposta e, ao observar a classificação proposta por Karamihas e Sayers (1998), notou-se que pavimentos antigos apresentam valores de IRI maiores que 6 m/km. Outro motivo para realizar a transposição de classe é que grande parte dos revestimentos dos pavimentos rodoviários do estado do Ceará, local onde foi desenvolvido e calibrado o aplicativo, são Tratamentos Superficiais, que, devido ao processo executivo,

tendem a apresentar valores de IRI maiores do que um pavimento revestido com Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ).

Diante do exposto, o SmartIRI possuiu como ideia central em seu desenvolvimento torná-lo simples e fácil de operar, de forma eficiente em termos de recursos para que não afete a vida útil da bateria do *smartphone*, bem como o desempenho geral do dispositivo enquanto o aplicativo estiver em funcionamento. Em relação à acurácia dos resultados os levantamentos, mostraram que os valores fornecidos pelo SmartIRI foram condizentes com outros métodos ou classes de equipamentos na maioria dos testes, conforme apresentado no capítulo posterior.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são descritos a análise e a discussão dos resultados obtidos com dados de perfilômetro a *laser*, método de Nível e Mira, aplicativos disponíveis no mercado e avaliação subjetiva, e a partir desses compará-los com os resultados coletados e aplicados no modelo matemático proposto neste trabalho já implementados no SmartIRI.

### 4.1 Resultados obtidos pela análise estatística da modelagem

Após utilizar os dados obtidos por Bisconsini (2016) para modelar a equação a partir de dados de aceleração vertical para o cálculo do *International Roughness Index* (Índice Internacional de Irregularidade – IRI), o *software* Minitab forneceu a seguinte informação em relação ao modelo, de acordo com a Figura 19.

Figura 19 – Modelo para obtenção do IRI

Model Summary						
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
	0,371457	91,17%	91,13%	91,01%		
Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	0,3453	0,0457	7,56	0,000		
RMS	4,0908	0,0634	64,53	0,000	1,94	
RMS*VEL	-0,028991	0,000776	-37,36	0,000	1,94	

Fonte: O Autor.

Para o P-Valor (*P-Value*), foi obtido um resultado menor do que o nível de significância adotado, que foi de 5%, ou seja, é possível concluir que há uma associação estatisticamente significativa entre a variável de resposta e o termo.

Em relação ao valor do VIF, o resultado verificado foi de 1,94. O VIF descreve quanta multicolinearidade existe em um modelo, a ausência da multicolinearidade simplifica a determinação de significância estatística. Valores de VIF situados entre 1 e 5 indicam

preditores moderadamente correlacionados, o que pode ser problemático porque a multicolinearidade pode aumentar a variância dos coeficientes de regressão.

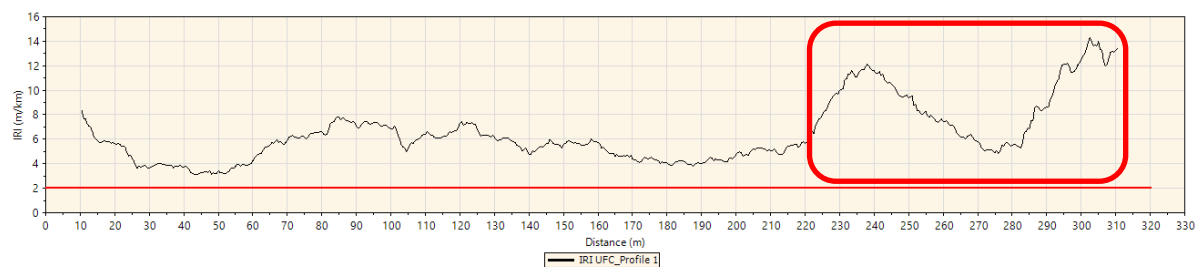
Para resolver esse problema, foram removidos alguns *outliers* do modelo, as mudanças foram monitoradas, e foi verificado que o modelo se comportou adequadamente. Outro parâmetro verificado foi o  $R^2$  ajustado (R-sq (adj)), que foi da ordem de 91%, indicando que o modelo produz uma reta de regressão que se ajusta bem aos dados.

## 4.2 Calibração e resultados obtidos em campo através do método de Nível e Mira

O perfil de referência utilizado para o cálculo do IRI, foi um trecho experimental localizado no *Campus* do Pici na Universidade Federal do Ceará. Um trecho de 320 m, no qual o perfil foi obtido por meio do método de Nível e Mira, como preconiza DNIT (1986). Os principais defeitos verificados no trecho experimental foram painelas e trincas de alta severidade. A presença desses defeitos foi importante para monitorar por meio de gráficos de dispersão os valores de IRI, já que com a presença destas patologias, o valor de IRI tende a ser elevado. No trabalho desenvolvido por Ramos (2017), é possível verificar a descrição das patologias apresentadas neste trecho experimental.

Ramos (2017) observou que essas patologias mencionadas, localizam-se na parte final do trecho em destaque (Figura 20), contribuindo para o surgimento de maior valor de IRI nesse segmento. A Figura 20 mostra o gráfico dos valores de IRI calculados utilizando o *software* ProVAL com destaque para o trecho final do pavimento.

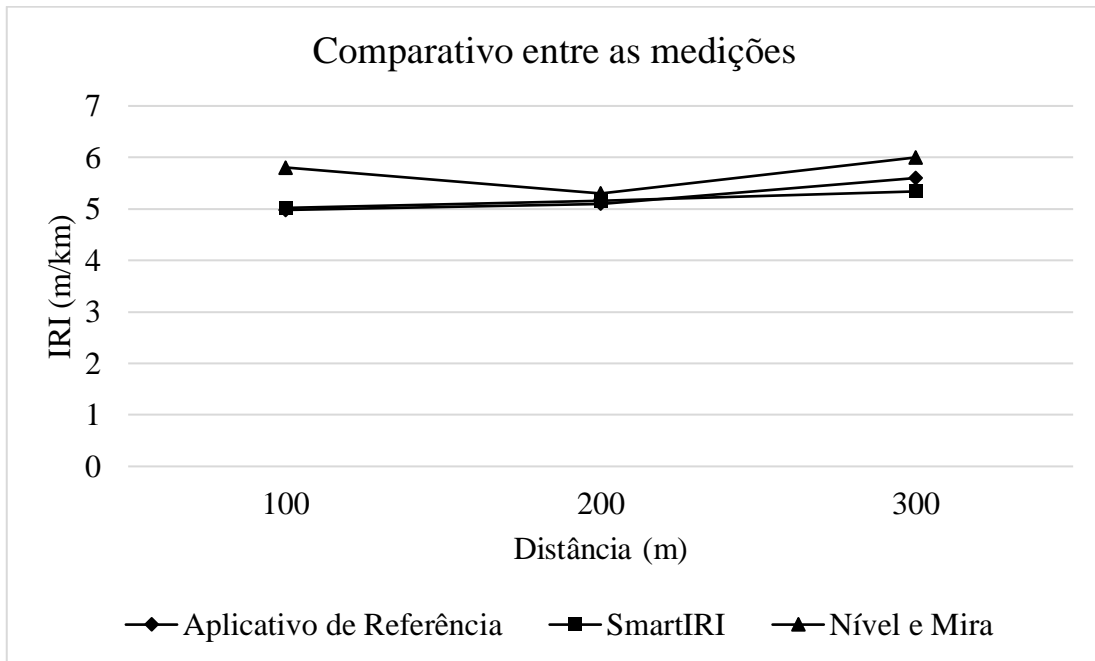
Figura 20 – Gráfico com valores de IRI do trecho experimental



Fonte: O Autor.

Para realizar a comparação entre os métodos (Nível e Mira, Aplicativo de Referência (*Roadlab*) e SmartIRI), um gráfico foi gerado com valores de IRI a cada 100 metros, de forma a comparar visualmente os processos. A Figura 21 mostra o gráfico gerado para a comparação.

Figura 21 – Gráfico comparativo entre as medições



Fonte: O Autor.

Observando-se a Figura 21, verifica-se que os valores de IRI ficaram próximos. O IRI do segmento central (200m) apresentou o menor valor para o método de Nível e Mira, assim como para o Aplicativo de Referência e para o SmartIRI. A maior diferença calculada foi de 11% nos 100m iniciais entre o método de Nível e Mira e o SmartIRI. Vale ressaltar que as medições com o Aplicativo de Referência e o SmartIRI, ocorreram em uma velocidade de 40 km/h. Não foi possível atingir velocidades maiores devido à pequena extensão do trecho.

O trecho experimental atingiu um alto nível de irregularidade, principalmente devido aos defeitos já mencionados (RAMOS, 2017). Esses valores elevados propiciaram uma pior condição de rolamento, diretamente verificada pelo usuário, e essa tendência foi verificada utilizando-se os dois aplicativos, tendo como referência a medida do método Nível e Mira.

#### 4.3 Resultados obtidos na comparação do aplicativo de referência e o SmartIRI

Devido à impossibilidade de utilizar o Perfilômetro a *laser* na maioria dos trechos analisados, optou-se por fazer um comparativo em todos os trechos analisados entre o Aplicativo de Referência (*Roadlab*), aplicativo desenvolvido pelo Banco Mundial, e o SmartIRI. Primeiro foi feito um teste de hipótese para averiguar a confiabilidade do aplicativo SmartIRI.

#### 4.3.1 *Teste-t de student para comparação entre as médias (Aplicativo de Referência e SmartIRI)*

Visando obter dados confiáveis, optou-se por utilizar uma aplicação estatística para averiguar se a média do aplicativo de referência é igual a média obtida pelo SmartIRI. Esse método estatístico foi realizado no Minitab e foram estabelecidas as seguintes hipóteses:

H0: a média dos valores obtidos pelo SmartIRI é igual a média dos valores obtidos pelo aplicativo de referência;

H1: a média dos valores obtidos pelo SmartIRI é diferente dos valores obtidos pelo aplicativo de referência.

Supondo que os valores obtidos seguem uma distribuição normal, o resultado do teste-t de *student* pode ser visualizado de acordo com a Figura 22.

Figura 22 – Resultado do Teste-t de *student*

Two-sample T for Aplicativo de Referência vs sIRI				
	N	Mean	StDev	SE Mean
Aplicativo de Referência	97	4,52	2,02	0,20
sIRI	97	4,11	1,63	0,17
Difference = $\mu$ (Aplicativo de Referência) - $\mu$ (sIRI)				
Estimate for difference: 0,408				
95% CI for difference: (-0,112; 0,928)				
T-Test of difference = 0 (vs $\neq$ ): T-Value = 1,55 <b>P-Value = 0,124</b> DF = 184				

Fonte: O Autor.

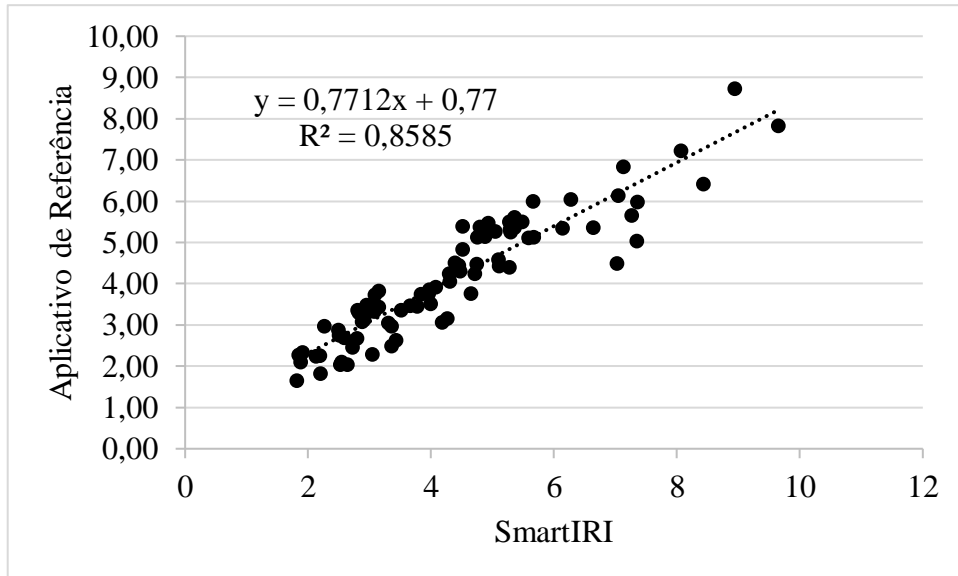
Observando-se o P-Valor, constata-se que é maior que o nível de significância (0,05), ou seja, há fortes evidências que a média dos valores obtidos pelo SmartIRI é igual a média dos valores obtidos pelo aplicativo de referência.

#### 4.3.2 *Aplicativo de Referência ('Roadlab') e o SmartIRI*

Tendo como base os valores do Aplicativo de Referência, verificou-se que os valores calculados no SmartIRI ficaram próximos ao obtido no método similar. O IRI calculado no SmartIRI foi comparado com o IRI calculado pelo Aplicativo de Referência. Ambos os valores de IRI foram calculados a partir das acelerações medidas pelos *smartphones* utilizados neste trabalho. Gráficos de dispersão e de linhas foram utilizados a

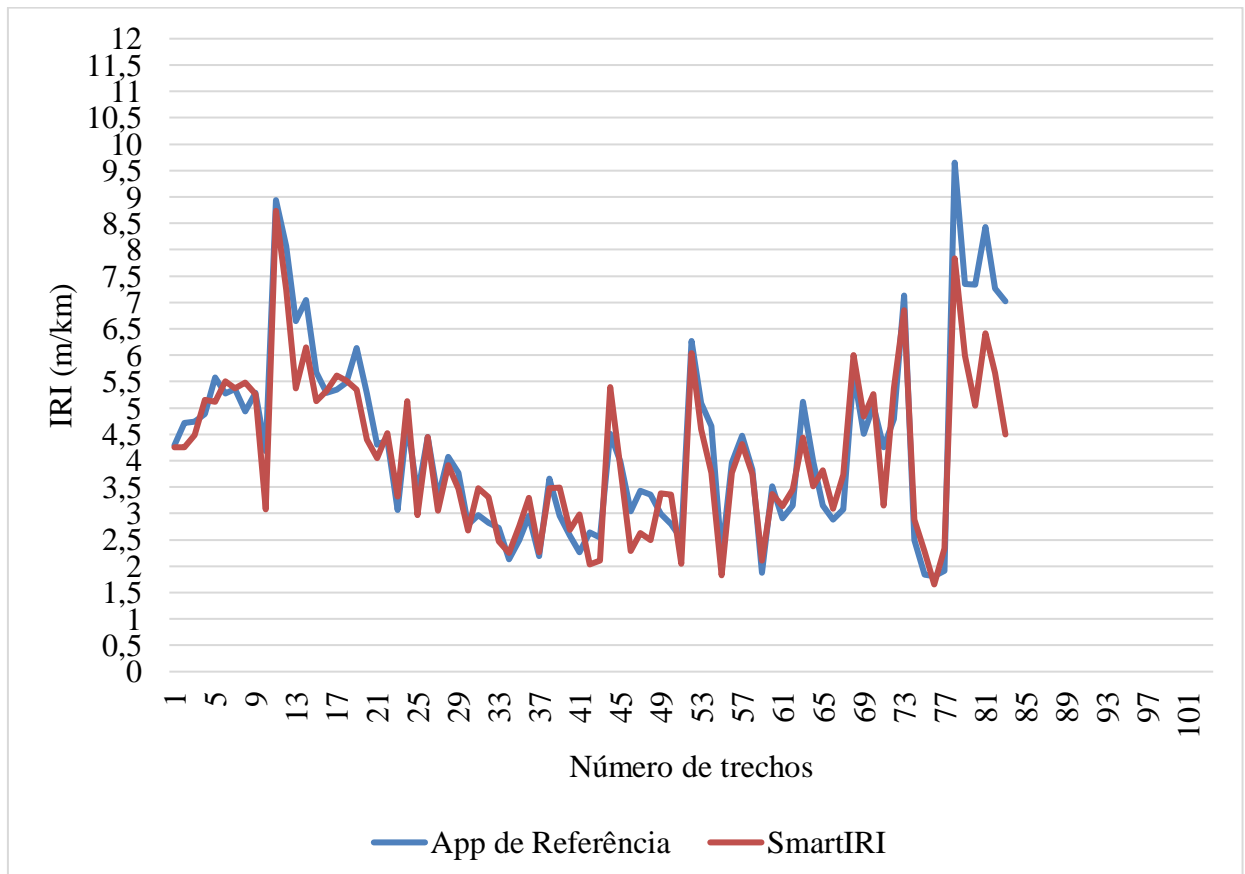
fim de analisar a relação entre os valores fornecidos pelos aplicativos. As Figuras 23 e 24 mostram os resultados dos gráficos gerados.

Figura 23 – Correlação entre IRI do Aplicativo de Referência e do IRI do SmartIRI



Fonte: O Autor.

Figura 24 – Gráfico de linhas comparando Aplicativo de Referência e SmartIRI



Fonte: O Autor.

Pode-se observar uma boa relação entre os valores de IRI obtidos por ambos os aplicativos. No entanto, a partir do trecho 77, notou-se uma diferença significativa nos valores de IRI calculados pelos dois métodos. Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que o trecho 77 a 84 corresponde à pista de pouso e decolagem do Aeroporto de Quixadá, localizado no Estado do Ceará, e que, na avaliação subjetiva e nos valores fornecidos pelo Aplicativo de Referência, notou-se também que os maiores valores de IRI estavam presentes na pista do Aeroporto de Quixadá. Uma explicação para essa diferença de valores calculados pode ser ter sido originada tanto pela irregularidade excessiva da pista, conforme pode ser observado na Figura 25, quanto pelo fato do usuário do aplicativo ter desenvolvido velocidades relativamente altas para um trecho bastante irregular, algo que não é recomendado.

Figura 25 – Detalhe da textura e visão geral do trecho



Fonte: O Autor.

Conforme foram variando as velocidades de medições (20 a 120 km/h) nos diversos trechos percorridos, constatou-se que velocidades mais baixas provocam uma excitação menor do sistema de suspensão do veículo. Desse modo, o sistema possui menor capacidade de medir os diferentes comprimentos de onda presentes no perfil do pavimento, que contribuem para os valores obtidos para o IRI.

Sayers *et al.* (1986) e Karamihas e Sayers (1998) recomendam que a velocidade operacional mínima para medidores do tipo resposta, como é o caso de *smartphones*, seja limitada, em aproximadamente 25 km/h, já que em velocidades baixas existe o fato da



envoltória dos pneus sobre irregularidades de alta frequência, devido à absorção de pequenas saliências pelo contato com o pneu. Os mesmos autores também mencionam que, para velocidades muito baixas, a aceleração vertical é muito pequena, o que pode interferir nas medições de IRI.

Além disso, Bisconsini (2016) afirma que o ruído inerente ao sistema produzido pelos *smartphones* tem efeito maior em baixas velocidades, já que sua amplitude se aproxima do sinal medido e, com isso, diminui sua relação com a irregularidade real do pavimento. Devido a esses motivos, no desenvolvimento desta pesquisa, observou-se que os melhores resultados obtidos foram com velocidades entre 60 a 80 km/h.

Para velocidades elevadas, acima de 110 km/h, verificou-se que o sistema de suspensão veicular começa a responder de forma diferente às irregularidades presentes no pavimento. O sistema de resposta tende a mitigar os valores de IRI, pois observou-se que não existe mais a envoltória dos pneus, e sim, os pneus começam a transpor a irregularidade minimizando o impacto, o que interfere nos sistemas de medição do tipo resposta. Ocorre, também, uma extrapolação dos dados, haja vista que para o modelo desenvolvido a velocidade máxima desenvolvida foi de 100 km/h.

#### **4.3.3 Análise de Dados Obtidos por Perfilômetro a Laser e o SmartIRI**

Para esta análise (perfilômetro e SmartIRI), utilizou-se o trecho da Rodovia Estadual CE-501, também conhecida como Avenida Senador Carlos Jereissati, localizada no município de Fortaleza no Estado do Ceará. O trecho correspondente para análise tem extensão de 4.100 m e possui revestimento do tipo Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ). Outro trecho que possui monitoramento de irregularidade realizado por perfilômetro a *laser* fica localizado no município de Tauá, no Estado do Ceará, com 1.000 m e pavimento revestido com Tratamento Superficial Duplo (TSD) e 1.000 m com revestimento do tipo CAUQ.

Para o trecho da rodovia CE-501, foram compilados valores de IRI a cada 600 m, tanto para os dados fornecidos pelo perfilômetro a *laser* como para os dados obtidos pelo SmartIRI. A escolha em trabalhar com dados a cada 600 m foi devido ao fato de que os valores de IRI fornecidos para a medição realizada pelo perfilômetro a *laser* foram realizadas com esse espaçamento. A Tabela 9 mostra os valores de IRI compilados a cada 600 m por ambos os métodos.

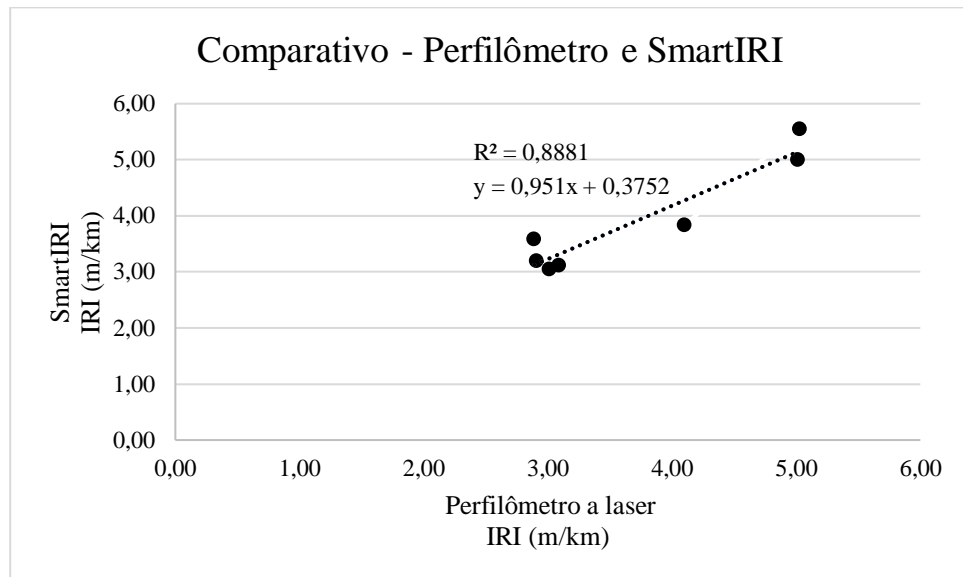
Tabela 9 – Comparativo dos valores de IRI entre Perfilômetro a *Laser* e SmartIRI.

Extensão do Trecho(m)	Método de Medição	
	Perfilômetro a <i>laser</i>	SmartIRI
	IRI(m/km)	
	Classificação DNIT (2006)	Classificação SmartIRI
600	3,01 (Regular)	3,06 (Bom)
1200	3,09 (Regular)	3,12 (Bom)
1800	2,91 (Regular)	3,21 (Bom)
2400	2,89 (Regular)	3,59 (Bom)
3000	4,10 (Ruim)	3,84 (Bom)
3600	5,03 (Péssimo)	5,56 (Ruim)
4100	5,01 (Péssimo)	5,01 (Ruim)

Fonte: O Autor.

O gráfico foi gerado a partir dos dados da Tabela 9. Obteve-se um valor de 0,8881 para o  $R^2$ , o que indica um alto coeficiente de determinação. A Figura 26 mostra o gráfico gerado.

Figura 26 – Comparativo entre os equipamentos de medição



Fonte: O Autor.

O arquivo .kml gerado pode ser executado no *software Google Earth*. A visualização do arquivo resultante da medição feita pelo SmartIRI no trecho da rodovia CE-501 pode ser observada na Figura 27.

Figura 27 – Mapa gerado pelo SmartIRI



Fonte: O Autor.

Observou-se que o trecho intermediário do segmento de estudo da CE-501 (Figura 27) existem dois encontros (E1 e E2) entre o pavimento e os extremos do tabuleiro da obra de arte especial, os quais ocasionam efeitos de solavanco nos veículos que trafegam pela via quanto do acesso ou saída do trecho sobre tabuleiro da obra de arte especial. Esses dois encontros foram detectados pelo aplicativo, sendo classificados com condição Regular.

Outro ponto a ser observado está no trecho final do pavimento analisado. Foram detectadas, pelo aplicativo proposto, péssimas condições de trafegabilidade ( $IRI = 5,01$  m/km), com presença de desgaste e remendos, conforme evidencia a Figura 28.

Figura 28 – Detalhe da parte final da medição.



Fonte: O Autor.

O outro trecho em que foi possível realizar um comparativo com dados obtidos por perfilômetro a *laser* foi o trecho localizado na cidade de Tauá. No momento da medição, realizada em julho de 2017, o aplicativo estava em fase de desenvolvimento, portanto não era possível discretizar os valores de IRI a cada 100 m, e sim, somente obter o valor médio total do trecho em análise. A Tabela 10 mostra o comparativo entre as medições que foram

realizadas no trecho experimental monitorado pelo DNIT. No Anexo A, constam os valores do levantamento realizado pelo perfilômetro a *laser* no trecho experimental localizado na BR -020.

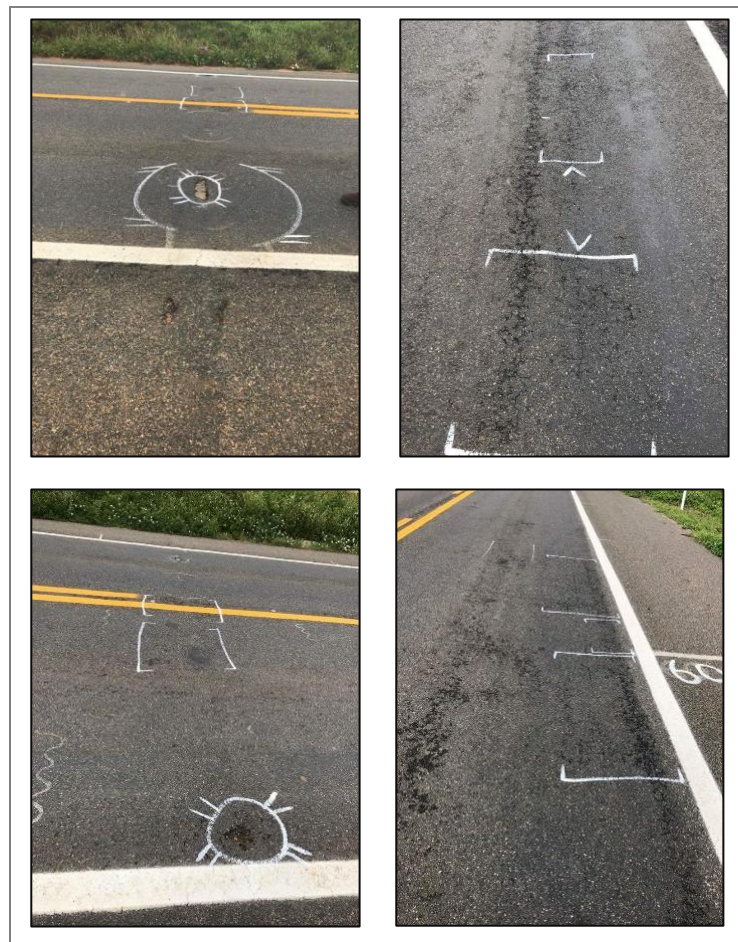
Tabela 10 – Comparativo dos valores de IRI do trecho em Tauá-CE - BR-020

Equipamento	Faixa Esquerda TSD	IRI (m/km)		
		Faixa Esquerda CAUQ	Faixa Direita TSD	Faixa Direita CAUQ
Perfilômetro a <i>laser</i>	2,97	1,20	3,01	1,13
SmartIRI	3,15	2,27	4,84	1,65

Fonte: O Autor.

Percebeu-se diferenças significativas para esse trecho em ambos os métodos de medição. No trecho revestido por TSD, observaram-se diversas patologias, tais como, trincas, buracos e exposição do agregado conforme evidencia a Figura 29.

Figura 29 – Defeitos observados



Fonte: O Autor.

Uma possível explicação para essa diferença entre os valores é a sobreposição entre os domínios de escalas de irregularidade de superfícies de pavimentos rodoviários por meio da amplitude (vertical). O aplicativo não conseguiu diferenciar a dimensão da textura das dimensões de irregularidade, devido principalmente à exposição do agregado e a já mencionada sobreposição do domínio de dimensão vertical para as classes de textura e irregularidade, conforme mostra Tabela 11. Outro fator que contribuiu foi que para o SmartIRI não foram utilizados filtro digitais para retirar a influência da textura.

Tabela 11 – Classificação da Textura

Domínio	Intervalo de dimensões	
	Horizontal	Vertical
Microtextura	0 – 0,5 mm	0 – 0,2 mm
Macrotextura	0,5 – 50 mm	0,2 – 10 mm
Megatextura	50 – 500 mm	1 – 50 mm
Irregularidade	0,5 m – 50 m	1 mm – 20 cm

Fonte: APS (2006).

Para o trecho com revestimento do tipo CAUQ, apesar de atingir a maior diferença entre as medições (89%), a classificação qualitativa fornecida pelo SmartIRI foi “bom”, ficando mais próxima da classificação “excelente” do que “regular”. Na outra faixa, a classificação foi obtida como “excelente”. Notou-se, com base nos dados de medição do trecho de Tauá, que o SmartIRI tendeu a sobrestimar suas medições quando a irregularidade possuía baixos valores, tais como no trecho revestido por CAUQ, possivelmente devido ao fato do SmartIRI não possuir a aplicação de filtros digitais que possam minimizar tal efeito.

Quanto menor o valor da irregularidade, maior tendeu a ser a diferença entre as medidas resultantes através da comparação feita com os dois equipamentos. Ainda em relação ao trecho localizado em Tauá, não é possível fazer uma afirmação conclusiva a respeito dos resultados encontrados, pois esses resultados derivam do aplicativo ainda em fase de elaboração/calibração, sem a devida inclusão de bases de referência que tivessem índices de irregularidade muito altos ou muito baixos.

Deve-se seguir, portanto, a recomendação de Barella (2008) e adotar cautela quando for comparar resultados de avaliações de irregularidade medidos com equipamentos de classes diferentes, pois ambos devem estar bem calibrados; caso contrário, as medições não serão fidedignas.

#### 4.3.4 Avaliação do Controle de Qualidade do Processo Executivo (Pavimento Rígido e Remendos)

De acordo com Pinto e Preussler (2010), dentre os múltiplos usos das medições de irregularidade longitudinal, pode-se destacar o controle da qualidade do serviço. Primeiramente, destaca-se que a irregularidade em pavimentos rígidos é medida com o emprego do Perfilógrafo Califórnia para determinação do Índice de Perfil (IP). Ressalta-se que, de acordo com DNIT (2013), o IP mínimo estabelecido para aceitação de obras de restauração e de pavimentos novos é de 240 mm/km.

No entanto, Albuquerque e Oliveira (2017), mostraram que o perfilômetro a *laser* pode ser uma alternativa para o monitoramento de características de perfis longitudinais para pavimento; logo, para os autores, o índice relacionado ao perfil de um pavimento rígido pode ser expresso em forma de IRI. Através dessa conclusão, foi possível utilizar o SmartIRI em pavimentos rígidos para avaliar as diferentes técnicas de acabamento da superfície. Os trechos em análise estão situados na Avenida Dioguinho e no Quarto Anel Viário, ambos no município de Fortaleza. A Tabela 12 fornece o resumo estatístico do levantamento.

Tabela 12 – Dados estatísticos (IRI) – Pavimento Rígido

Dados	Pavimento Rígido	
	Av. Dioguinho	Quarto Anel Viário
Extensão (km)	3,0	8,7
Média (IRI m/km)	5,56	2,99
Desvio Padrão (m/km)	0,6	0,45
Coefficiente de Variação	10,79%	15,76%

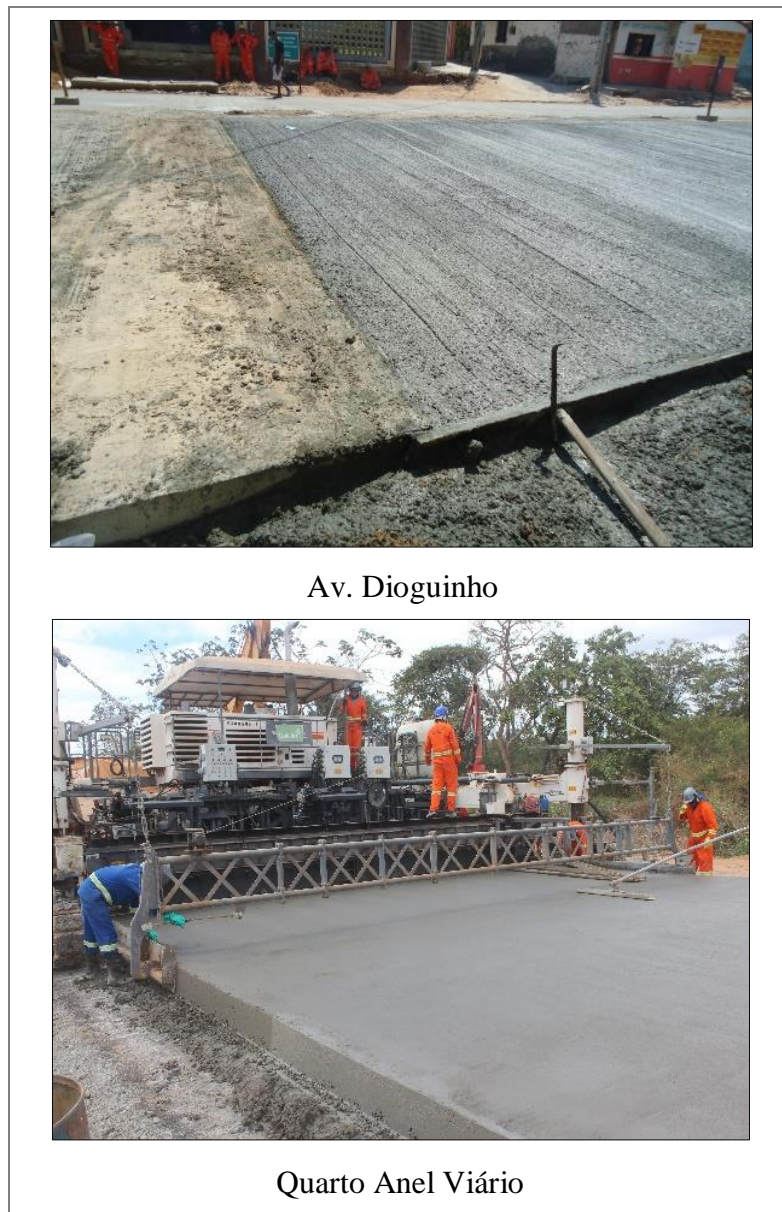
Fonte: O Autor.

Observou-se, tanto *in loco* como analisando os dados de irregularidade longitudinal, que o pavimento rígido da Avenida Dioguinho possui um acabamento superficial com qualidade inferior ao do Quarto Anel Viário. Devido aos revestimentos possuírem as mesmas características de textura superficial e a mesma idade, esperava-se que os valores de IRI apresentassem uma distribuição semelhante dos dados. No entanto, observou-se que o trecho da Av. Dioguinho apresentou maior média quando comparado ao trecho do Quarto Anel Viário, apesar de que o tráfego atuante na Av. Dioguinho é

considerado moderado enquanto que no Quarto Anel Viário o tráfego é considerado de alto volume.

Também foi possível constatar que essa diferença considerável entre os dados se deve, possivelmente, à execução das placas de Concreto de Cimento Portland - CCP e ao processo de texturização manual aplicado no trecho da Av. Dioguinho. Este mesmo segmento, apresenta diversas ranhuras transversais deixando a superfície bastante rugosa; diferentemente do que ocorre no trecho do Quarto Anel Viário, segmento no qual foi utilizado processo de texturização mecânico, deixando a superfície mais uniforme e menos irregular, conforme mostra Figura 30.

Figura 30 – Aspectos da texturização das superfícies

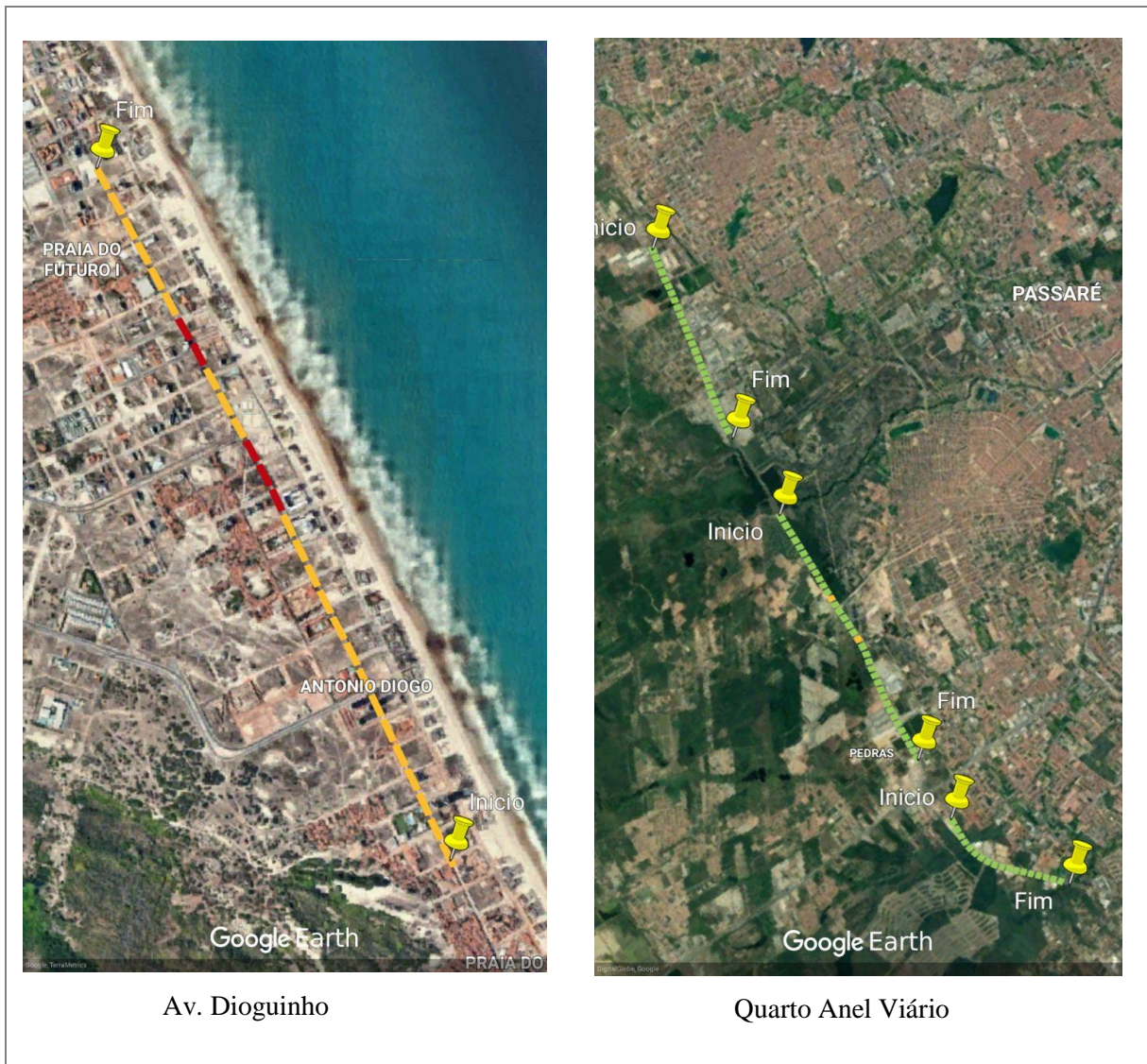


Av. Dioguinho

Quarto Anel Viário

Os arquivos .kml gerados pelo SmartIRI forneceram como resultados as imagens expostas na Figura 31. Observou-se que o trecho da Av. Dioguinho em quase sua totalidade apresentou maior desconforto ao rolamento, enquanto que o trecho do Quarto Anel Viário apresentou boas características referentes à presença de irregularidade.

Figura 31 – Trechos em CCP avaliados com o SmartIRI



Fonte: O Autor.

Outro trecho no qual foi possível avaliar um serviço de manutenção, a partir de dados provenientes de perfilômetro a *laser* (Anexo B) e do SmartIRI, localiza-se na BR-020, no município de Caucaia, estado do Ceará, entre os km 400,1 e 400,4, conforme evidencia a Figura 32.



Figura 32 – Trecho BR-020 – Serviço de manutenção



Fonte: O Autor.

Devido à imprecisão verificada no GPS para o aplicativo SmartIRI, as medições discretizadas não correspondem exatamente a 100 m, tal como ocorre no perfilômetro a *laser*. Ocorre uma variação dessas medições de extensão da ordem de 10% para mais. Portanto, não foi possível concatenar os trechos pertencentes às distintas classes de medição. No entanto, foi possível realizar um teste de hipótese para verificar se a médias das medições correspondentes são iguais. Adotando como hipótese nula que as médias são iguais com 95% de confiança, o resultado do teste de hipótese realizado no *software* Minitab forneceu o seguinte resultado de acordo com a Figura 33.

Figura 33 – Teste de Hipótese para a média

Two-sample T for SmartIRI vs Perfilômetro a laser				
	N	Mean	StDev	SE Mean
SmartIRI	33	3,479	0,408	0,071
Perfilômetro a laser	33	3,222	0,581	0,10

Difference =  $\mu$  (SmartIRI) -  $\mu$  (Perfilômetro a laser)  
 Estimate for difference: 0,257  
 95% CI for difference: (0,009; 0,504)  
 T-Test of difference = 0 (vs  $\neq$ ): T-Value = 2,08 **P-Value = 0,042** DF = 57

Fonte: O Autor

Nota-se que o P-Valor, apesar de próximo ao nível de significância (0,05), possui um valor menor. Então, tem-se evidência forte para concluir que a medida do SmartIRI

resulta em uma média para o referido trecho diferente da média obtida pelo perfilômetro a *laser* para os valores de IRI.

Para o mesmo trecho em análise, observou-se a presença de remendos em toda a extensão e que, possivelmente, poderia provocar desconforto ao rolamento, já que, na maioria dos casos, o remendo é um local que proporciona um segmento de fragilidade do revestimento. Apesar dos valores obtidos por meio de equipamentos de classes distintas serem diferentes, observou-se que em relação ao valor médio de IRI obtido por dois equipamentos distintos ficaram próximos, 3,47 m/km para o SmartIRI e 3,22 m/km para o perfilômetro a *laser* conforme mostra a Figura 33.

Essa possível diferença (rejeição da hipótese nula) deve-se possivelmente ao fato de que, no processo de calibração do SmartIRI, pouco se percorreu trechos com presença de remendos. Mesmo assim, verificou-se a possibilidade da utilização do SmartIRI para avaliar a qualidade do serviço executado. Constatou-se visualmente e pelo resultado da medição efetuada pelo SmartIRI que o serviço de tapa-buraco foi bem executado apesar de já apresentar sinais de envelhecimento do material. Na Figura 34, é possível observar os remendos executados no trecho da BR-020.

Figura 34 – Vista geral e detalhe dos remendos



Fonte: O Autor.

#### 4.3.5 Avaliação Subjetiva (VSA) e o SmartIRI

Para realizar esta comparação, é importante mencionar os valores e os conceitos qualitativos de VSA e compará-los com os do SmartIRI. A Tabela 13 mostra a classificação da serventia por meio do VSA e do SmartIRI. Vale ressaltar que os valores de IRI e VSA têm uma relação inversa, haja vista no primeiro quanto menor o valor, melhor o rolamento; e, no segundo, o contrário acontece.

Tabela 13 – Intervalos de valores e conceitos qualitativos

VSA	IRI (m/km)	CLASSIFICAÇÃO
$0 \leq VSA < 1$	$6 \leq IRI$	Ruim / Péssimo
$1 \leq VSA < 2$		
$2 \leq VSA < 3$	$4 \leq IRI < 6$	Regular
$3 \leq VSA < 4$	$2 \leq IRI < 4$	Bom
$4 \leq VSA \leq 5$	$0 < IRI < 2$	Excelente

Fonte: O Autor.

Os dados de VSA foram obtidos de levantamentos feitos por equipes formadas por pesquisadores de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará (UFC). O levantamento foi executado por três equipes, as quais utilizaram veículos de passeio de características semelhantes, sendo o levantamento, realizado no mesmo dia com condições climáticas favoráveis.

As equipes foram compostas por cinco membros como preconiza DNIT (2003), as quais, com o auxílio de um odômetro, percorreram toda a extensão da mesma rodovia de estudo (Avenida Senador Carlos Jereissati ou rodovia CE -501) marcando os trechos de 600m, com um veículo trafegando com uma velocidade média de 60km/h, atribuindo notas de 0 a 5, sendo 0 uma condição péssima e 5 uma condição ótima.

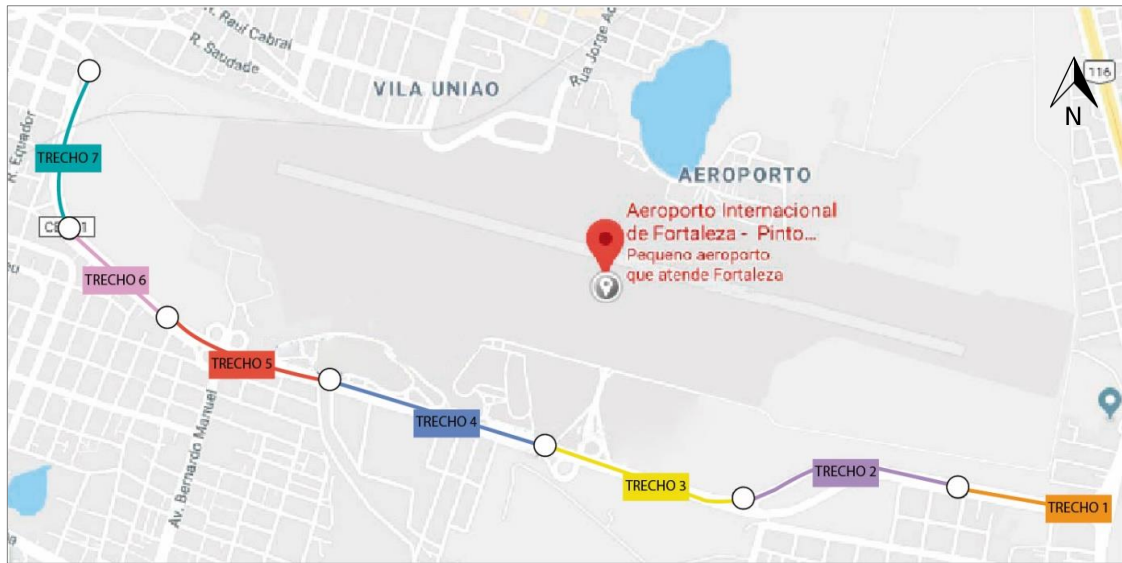
Os dados coletados foram dispostos em uma planilha, com o objetivo de comparar tais dados com os obtidos pelo SmartIRI e estudar os parâmetros de correlação. As informações foram divididas em intervalos de 600m, totalizando 7 segmentos. Os valores coletados por cada equipe, bem como as médias de VSA e IRI são mostradas na Tabela 14 e a localização dos trechos na Figura 35.

Tabela 14 – Valores de VSA e IRI (SmartIRI)

	Trechos	1	2	3	4	5	6	7
	Intervalos (m)	0 a 600	600 a 1200	1200 a 1800	1800 a 2400	2400 a 3000	3000 a 3600	3600 a 4100
<b>Equipe 1</b>	VSA	3,5	4,0	3,8	4,0	3,8	2,3	2,0
<b>Equipe 2</b>		3,4	3,9	3,8	3,7	3,6	2,7	2,5
<b>Equipe 3</b>		3,2	3,9	4,0	4,0	3,6	2,8	2,5
<b>Média</b>	VSA	3,4	3,9	3,9	3,9	3,7	2,6	2,3
	IRI (m/km)	3,06	3,12	3,21	3,59	3,84	5,56	5,01

Fonte: O Autor.

Figura 35 – Localização dos trechos



Fonte: O Autor.

De posse dos dados da Tabela 14, pode-se obter parâmetros estatísticos para analisar a correspondência entre os valores de VSA e de IRI obtidos por meio do aplicativo SmartIRI. Os dados estatísticos podem ser observados na Tabela 15.

Tabela 15 – Valores Estatísticos de VSA e IRI (SmartIRI)

<b>Estatística descritiva</b>	<b>VSA</b>	<b>IRI (m/km)</b>
<b>Média</b>	3,39	3,91
<b>Desvio padrão</b>	0,67	0,99
<b>Coefficiente de variação (%)</b>	19,77	25,29
<b>Mínimo</b>	2,3	3,06
<b>Máximo</b>	3,9	5,56

Fonte: O Autor.

Além disso, os dados de coeficiente de correlação e determinação, importantes para a explicação do modelo de obtenção do SmartIRI, no que se refere ao comparativo de dados, são verificados na Tabela 16.

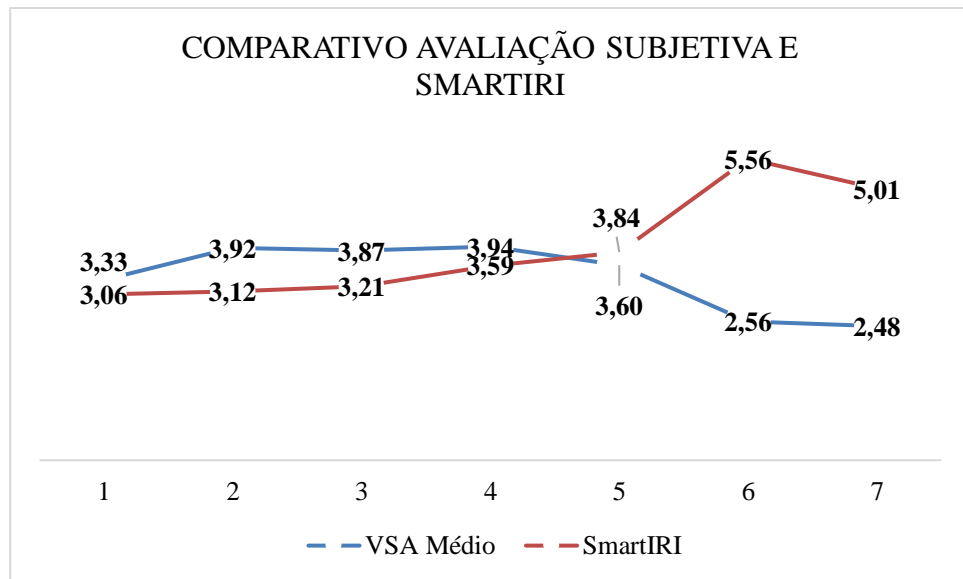
Tabela 16 – Valores de Correlação e Determinação de VSA e IRI (SmartIRI)

	<b>Equipe 1</b>	<b>Equipe 2</b>	<b>Equipe 3</b>	<b>Média</b>
<b>Correlação</b>	-0,89	-0,89	-0,78	-0,87
<b>R<sup>2</sup></b>	0,79	0,80	0,62	0,76

Fonte: O Autor.

Com os resultados obtidos, foi possível avaliar os parâmetros sobre os dados levantados. Foi verificada uma forte correlação entre dados de VSA com aqueles obtidos pelo SmartIRI, sendo, aproximadamente, de 0,76. Um gráfico de linhas foi elaborado para representar o comportamento dos índices em estudo à medida que o trecho é percorrido, conforme evidencia a Figura 36.

Figura 36 – Comparativo VSA e SmartIRI



Fonte: O Autor.

De acordo com a Figura 36, pode-se observar que, à medida que o IRI aumenta de valor, o VSA decresce, confirmando a relação inversa entre esses dois dados. Além disso, evidencia-se no valor do coeficiente de correlação, cujo valor a partir das médias dos índices foi de -0,87. Também pode ser observada a presença de baixa irregularidade da rodovia nos trechos iniciais (1 a 5) e o aumento da irregularidade no trecho extremo (6 e 7) da rodovia estudada, já que os maiores valores de IRI e os menores valores de VSA foram verificados no final do trecho analisado.

#### **4.3.6 Considerações sobre os Resultados Obtidos**

Verificou-se que grande parte dos resultados obtidos possuem forte correlação entre as distintas classes de medição. Porém isso não significa que os resultados dos valores de IRI calculados sejam semelhantes, pois o resultado depende da taxa de aquisição de dados utilizada, da condição do pavimento, da resposta dinâmica do veículo utilizado, que varia de

acordo com as características dinâmicas (incluindo velocidade) e do algoritmo utilizado no cálculo dos deslocamentos, conforme Bisconsini (2016).

Bisconsini (2016) afirma que, se o interesse é aplicar diretamente os valores de IRI, o cálculo deve incluir a modelagem do veículo ou assistência de outros sensores de medição de distância para remover a influência da resposta ao veículo no perfil do pavimento medido e que, mesmo que a ordem de grandeza dos resultados seja semelhante, a abordagem de um equipamento do tipo resposta não equivale a de um perfilômetro, pelo menos quantitativamente.

No entanto, apesar de não ter sido realizada a modelagem do veículo, o procedimento de calibração por meio de um método de referência (Nível e Mira) foi aplicado ao SmartIRI e observou-se nos resultados que a avaliação subjetiva (ou qualitativa) possuiu forte correlação com o medidor do tipo resposta (SmartIRI), mesmo desconsiderando a ordem de grandeza dos valores semelhantes entre perfilômetro inercial e um equipamento do tipo resposta. Isso pode contribuir para que um Sistema de Gerência de Pavimentos auxilie nas tomadas de decisões no que diz respeito às atividades de manutenção e reabilitação sobretudo em nível de rede, quando for inviável, por falta de recursos.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo, são apresentadas as principais conclusões do trabalho e sugestões para estudos futuros, que resultaram da elaboração de um aplicativo para *smartphone* visando estimar a irregularidade longitudinal de pavimentos. Ressalta-se que as conclusões obtidas estão vinculadas às especificidades do estudo aqui descrito e a partir delas, pôde-se conhecer melhor as potencialidades e as limitações do aplicativo proposto, o SmartIRI.

### 5.1 Conclusões

Esse trabalho tratou do desenvolvimento de um aplicativo para *smartphone* de modo a estimar a irregularidade longitudinal em pavimentos rodoviários. Procurou-se utilizar o *smartphone* por ser um equipamento de baixo custo, alta produtividade e facilidade operacional, além do fato de que, até o final da elaboração desta pesquisa, era desconhecida a existência de algum aplicativo de origem nacional que fosse voltado para tal propósito.

Os dados coletados foram aplicados em um modelo matemático. A partir de valores de RMS, foi possível estimar os valores do Índice Internacional de Irregularidade (IRI) dos trechos de pavimentos analisados com diferentes níveis de irregularidade e de características superficiais, tais como textura e revestimento. Para aferição dos resultados obtidos com o aplicativo, utilizaram-se métodos e equipamentos consagrados no levantamento de irregularidade longitudinal ou condição de serventia do pavimento, tais como o Nível e Mira, o perfilômetro inercial a *laser* e o Valor de Serventia Atual (VSA).

Constatou-se que o advento da tecnologia embarcada em dispositivos móveis tem levado a um maior uso dos *smartphones* para a aquisição de diferentes tipos de dados. Estes aparelhos poderão auxiliar os técnicos de órgãos rodoviários nas tomadas de decisões, já que a tecnologia instalada nestes dispositivos atingiu uma alta performance, permitindo obter resultados satisfatórios com relação aos valores estimados de IRI, a partir dos sinais de aceleração vertical que o SmartIRI foi capaz de coletar, apesar de nesta pesquisa não terem sido utilizados filtros de sinais, que provavelmente teriam permitido se alcançar índices mais precisos.

Quanto à taxa de aquisição de dados, preferiu-se trabalhar com taxa de 100Hz, já que essa característica depende do modelo de *smartphone* utilizado. Embora a filtragem dos sinais possa contribuir para resultados mais precisos, o aumento da taxa de aquisição de dados também poderia aumentar a acurácia do sistema.

Outra limitação, e possivelmente a maior, é que por se tratar de um sistema de medida de irregularidade do tipo resposta, é necessária a calibração do sistema a partir de método de levantamento de referência, já que os resultados variam de acordo com o modelo do veículo utilizado, modelo do *smartphone* e velocidade de operação.

Também não foram exploradas as variações dos componentes do sistema, tais como a massa do veículo, a pressão dos pneus, o sistema de suspensão e o alinhamento e balanceamento dos pneus. No entanto, ao efetuar os levantamentos, todos esses parâmetros foram mantidos constantes e com a devida manutenção. Essas características podem ser incluídas em estudos futuros como parte do cálculo do IRI.

Apesar da influência de todos esses fatores citados, os resultados indicaram que o uso do aplicativo foi aceitável para estimar os dados de irregularidade longitudinal em pavimentos rodoviários, salientando o baixo custo de aquisição e operação dos dados. Quando da comparação dos aplicativos com os métodos tradicionais de medição de irregularidade longitudinal, tal como o método de Nível e Mira, quando na determinação da condição funcional por meio do VSA, o SmartIRI apresentou desempenho superior em relação ao tempo de aquisição de dados.

Outro ponto observado é que a utilização do SmartIRI com a análise dos dados fornecidos podem indicar a presença de imperfeições superficiais na via. Os trechos que proporcionaram valores elevados de IRI apresentaram maior quantidade de defeitos no revestimento, confirmados através de inspeções visuais feitas pelos autores. Os principais defeitos encontrados que contribuíram para a dispersão dos dados foram buracos e remendos, que geram maior desconforto ao rolamento.

Também verificou-se que o aplicativo desenvolvido pode ser utilizado em locais onde a gestão rodoviária possui poucos recursos financeiros para monitorar a condição do pavimento, pois neste sistema proposto pode-se realizar uma coleta de dados contínua, com custo reduzido, inclusive para aplicação em outros tipos de vias, tais como pavimento rígido ou não pavimentada.

Por fim, conclui-se que os *smartphones* se apresentam com uma alternativa viável na análise preliminar da condição funcional dos pavimentos, pois, através das informações obtidas e correta análise dos dados, pode auxiliar as tomadas de decisões dos órgãos gestores. Essas novas tecnologias desenvolvidas possuem baixo custo, fácil operação e alta produtividade com potencial de melhoria, podendo ser utilizadas em larga escala.



## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir serão apresentadas algumas sugestões para pesquisas futuras relacionadas ao uso de *smartphones* para a estimativa da irregularidade longitudinal dos pavimentos:

- a) utilizar nos levantamentos mais trechos monitorados com dados disponíveis de outros tipos de equipamentos de forma a comparar os índices obtidos por outros medidores de irregularidade e o SmartIRI, aquisição de outros modelos de veículos de médio e grande porte, outros tipos de suportes veiculares, modelos distintos de *smartphones* e variar a taxa de aquisição de dados para calibração mais precisa do sistema;
- b) utilizar o aplicativo em pavimentos com diversos tipos de revestimento, incluindo o pavimento rígido e comparar com os dados de um perfilógrafo Califórnia;
- c) aferir com o SmartIRI o ganho em serventia do pavimento após atividades de manutenção e restauração e efetuar a comparação entre a escala proposta por Sayers e Karamihas (1998) e as diversas escalas propostas pelos órgãos rodoviários.
- d) analisar a obtenção de índices de irregularidade com o SmartIRI em trechos urbanos, nos quais desenvolvem-se baixas velocidades;
- e) verificar a influência da macrotextura, mais precisamente em texturas mais abertas, nas quais a exposição do agregado pode contribuir para o aumento da vibração do veículo contribuindo para o acréscimo no valor da irregularidade longitudinal;
- f) analisar, também, a eficácia desse sistema proposto para ambientes de vias não pavimentadas;
- g) melhorar o aplicativo para que sejam feitas capturas automáticas de imagens, adicionar outras funcionalidades ao aplicativo, tal como análise da textura superficial dos pavimentos por meio do processamento digital de imagens;
- h) efetuar o cálculo do custo operacional veicular por meio dos valores de IRI, características do veículo e velocidade operacional no próprio aplicativo.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, F. S.; OLIVEIRA, R. F. S. de. Avaliação de perfil longitudinal de pavimento de concreto de cimento Portland com perfilômetro inercial a laser. **TRANSPORTES**, [s.l.], v. 25, n. 1, p.82-92, 1 mar. 2017.
- 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 Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies, Ubicomm, pp. 210-215, 2014. Disponível em:<[http://www.researchgate.net/profile/Emanuele\\_Lattanzi/publication/271700011\\_SmartRoadSense\\_Collaborative\\_Road\\_Surface\\_Condition\\_Monitoring/links/54cf57c70cf24601c0933aaf.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Emanuele_Lattanzi/publication/271700011_SmartRoadSense_Collaborative_Road_Surface_Condition_Monitoring/links/54cf57c70cf24601c0933aaf.pdf)>. Acesso em 22 mai. 2017.
- APS, M. **Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI-Internacional Friction Index para revestimentos asfálticos**. 2006. 179 f. Tese de Doutorado – Curso de Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- AUSTRALIAN TRANSPORT. **Department of Infrastructure and Regional Development**. 2016. Disponível em: <<https://atap.gov.au/parameter-values/road-transport/5-vehicle-operating-cost-voc-models.aspx>>. Acesso em: 07 jun. 2017.
- BARELLA, R. M. **Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais**. 2008. 362f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transporte). Universidade de São Paulo, 2008.
- BENNET, C. R. Data Collection Technologies For Pavement Management Systems. In: **7th International Conference on Managing Pavement Assets**. 2008.
- BERNUCCI, L. B. et al. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. **Rio de Janeiro**, v. 504, 2007.
- BISCONSINI, D. R. **Avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos com dados coletados por smartphones**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2016.
- BUTTLAR, W. G.; ISLAM, S. Effect of pavement roughness on user costs. **Transportation Research Record**, v. 2285, n. 1, p. 47-55, 2012.
- BUTTLAR, W. G. et al. Measurement of pavement roughness using android-based smartphone application. **Transportation Research Record**, v. 2457, n. 1, p. 30-38, 2014.
- CNT (Confederação Nacional dos Transportes). **Relatório Gerencial: Pesquisa CNT de Rodovias 2017**. 21ª ed. Brasília: CNT, SEST, SENAT, 2017.

DOUANGPHACHANH, V. **The Development of a Simple Method for Network-wide Road Surface Roughness Condition Estimation and Monitoring Using Smartphone Sensors**. 2014. Tese de Doutorado, Tokyo Metropolitan University. Tokyo, Japão, 2014

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Especificação de Serviço - Método de nível e mira para calibração de sistemas medidores de irregularidade tipo resposta**. DNER – ES 173/86. Ministério dos Transportes, Rio de Janeiro. 1986

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Medição da Irregularidade de Superfície de Pavimento com Sistemas Integradores IPR/USP e Maysmeter**. DNER-PRO 182/94. Ministério dos Transportes, Rio de Janeiro. 1994b

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manutenção de Sistemas Medidores de Irregularidade Longitudinal de Superfície de Pavimento – Integrador IPR/USP e Maysmeter**. DNER-PRO 229/94. Ministério dos Transportes. Rio de Janeiro, 1994c

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos** - Procedimento. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro. 2003.

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

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. **Instrução de Serviço/DG N°13**. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2013.

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

FERNANDES JR., J. L.; BARBOSA, R. E. Estimativa das cargas dinâmicas dos veículos rodoviários que atuam sobre os pavimentos e pontes. **TRANSPORTES**, v. 8, n. 2, 2000.

FORSLÖF, L.; JONES, H. **Roadroid: continuous road condition monitoring with smart phones**. In: **IRF 17th World Meeting and Exhibition, Riyadh, Saudi Arabia**. Available from <http://www.roadroid.com/common/References/IRF>. 2013.

GADELHA, B. A. **Descrição da nova tecnologia de execução das placas de concreto do quarto anel viário de Fortaleza – CE**. Trabalho de conclusão de curso – Universidade de Fortaleza – UNIFOR. 2014.

GONZÁLEZ, A. et al. The use of vehicle acceleration measurements to estimate road roughness. **Vehicle System Dynamics**, v. 46, n. 6, p. 483-499, 2008.

HANSON, T. R.; CAMERON, C. **Can a smartphone collect IRI data?** Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada – Transportation: Innovations and Opportunities. Fredericton, NB, Canada. 2012. Disponível em: <<http://conf.tacatc.ca/english/annualconference/tac2012/docs/session29/hanson.pdf>>. Acesso em: 22 mai. 2017.

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, p. 819-827, 2014.

HIRPAHUANCA, D. L. **Determinación y Comparación de la Regularidad Superficial del Pavimento de la Carretera Cusco-Urcos, Usando Teléfonos Inteligentes y el Rugosímetro de MERLIN**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidad Andina del Cusco. 2016.

KARAMIHAS, S.M. SAYERS, M.W. **The Little Book of Profiling. Basis information about measuring an interpreting road profiles**. The Regent of the University of Michigan. 1998.

KERALI, Henry GR; ODOKI, Jennaro B.; STANNARD, E. Overview of HDM-4. **The Highway Development and Management Series**, v. 4, 2000.

LU, X. P. **Effects of Road Roughness on Vehicular Rolling Resistance: Measuring Road Roughness and Its Effects on User Cost and Comfort**. ASTM Special Technical Publication 884, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa., pp. 143–161, 1985..

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G.. **Mecânica dos Pavimentos**. 3. ed. [s.l.]: Interciência, 2015. 640 p.

MEDNIS, A., STRAZDINS, G., ZVIEDRIS, R., KANONIRS, G., SALEVO, L. **Real time pothole detection using Android smartphones with accelerometers**. In: Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS), 2011. International Conference on [online]. IEEE, pp. 1–6. Disponível em: <<http://strazdins.lv/papers/mednis2011androidpotholes.pdf>>. Acesso em: 22 mai. 2017.

MESQUITA, J. C. L. **Pavimento rígido como alternativa econômica para pavimentação rodoviária**. Florianópolis, UFSC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2001. XV, 135 p. Dissertação: Mestrado em Engenharia Civil (Construção Civil). 2001.

MORAES, O. L. P. de. Avaliação econômica, programação e planejamento de investimentos em rodovias por meio do sistema HDM-4: manual do aluno. **Rio de Janeiro: IPR, 2010.**

MÚČKA, P. **International Roughness Index specifications around the world.** Road Materials and Pavement Design, v. 18, n. 4, p. 929-965, 2017.

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

PIARC. **Manual do Usuário do Programa HDM-4.** Volume 04,1 CD-ROM. 2010.

PINTO, S., PREUSSLER, E.S. **Pavimentação rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis.** 2ª edição. Rio de Janeiro/RJ: Copiarte. 2010.

RAMOS, S. P. **Análise da Viabilidade Técnica dos Levantamentos de Baixo Custo de Perfil e Irregularidade Longitudinal de Pavimento com o Uso de Acelerômetros Controlados por Arduíno Auxiliado por Bicicleta.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza. 2017.

SAYERS, M. W. **The international road roughness experiment:** Establishing correlation and a calibration standard for measurements. 1986

SAYERS, M. W.; GILLESPIE, T. D.; QUEIROZ, C. A. V. **The international road roughness experiment:** a basis for establishing a standard scale for road roughness measurements. Transportation Research Record, v. 1084, p. 76-85. 1986.

STRAZDINS, G. et al. Towards vehicular sensor networks with android smartphones for road surface monitoring. In: **2nd International Workshop on Networks of Cooperating Objects (CONET'11), Electronic Proceedings of CPS Week. 2011. p. 2015.**

TAI, Y.; CHAN, C.; HSU, J. Y.. Automatic road anomaly detection using smart mobile device. In: **conference on technologies and applications of artificial intelligence, Hsinchu, Taiwan.** 2010.

TOMIYAMA, K., KAWAMURA, A., NAKAJIMA, S., ISHIDA, T., JOMOTO, M. **A Mobile Profilometer for Road Surface Monitoring by Use of Accelerometers.** 2012.

WANG, W. e GUO, F. **RoadLab – Revamping Road Condition and Road Safety Monitoring by Crowdsourcing with Smartphone App.** Transportation Research Board 95<sup>rd</sup> Annual Meeting, Washington D.C., U.S.A. 2016.

YAGI, K. **Preliminary report for IRI changes after KUMAMOTO earthquake Japan, by using Smartphone roughness measurement.** 2<sup>nd</sup> IRF Asia Regional Congress & Exhibition. 2016.

ZAABAR, I.; CHATTI, K. Calibration of HDM-4 models for estimating the effect of pavement roughness on fuel consumption for US conditions. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2155, p. 105-116, 2010.

ZANIEWSKI, J. P. **Effect of Pavement Surface Type on Fuel Consumption**. Portland Cement Association, Skokie, 1989.

## APÊNDICE

### APÊNDICE A – TUTORIAL DE UTILIZAÇÃO DO SMARTIRI

#### TUTORIAL DE UTILIZAÇÃO DO SMARTIRI



# SmartIRI

Desenvolvido por



# TUTORIAL DE UTILIZAÇÃO DO SmartIRI

- **APRESENTAÇÃO DO APLICATIVO**

O aplicativo SmartIRI requer apenas como passo inicial calibrar o aparelho na posição vertical, podendo logo após ser iniciada a medição.

Iniciada a medição, dados de aceleração vertical provenientes do acelerômetro e dados provenientes do GPS serão coletados e processados no próprio dispositivo, os quais após o término da medição os dados poderão ser enviados via correio eletrônico ou serem analisados no próprio dispositivo.

- **EQUIPAMENTO NECESSÁRIO**

Os equipamentos necessários para a realização das medições são um *smartphone* que possua além do sensor de acelerômetro, o sensor de giroscópio; um veículo e suporte veicular para *smartphone*, que deverá ser fixado no para-brisas. É importante que antes da calibração o veículo esteja em uma superfície plana.

Vale ressaltar que o suporte esteja bem fixado no para-brisa e não transfira vibrações excessivas ao aparelho de forma a gerar resultados imprecisos. Nas Figura 1 e 2 observa-se dois tipos de suportes, um recomendando e outro não recomendado.

**Figura 1:** Suporte recomendado (a) e suporte não recomendado (b)



(a)

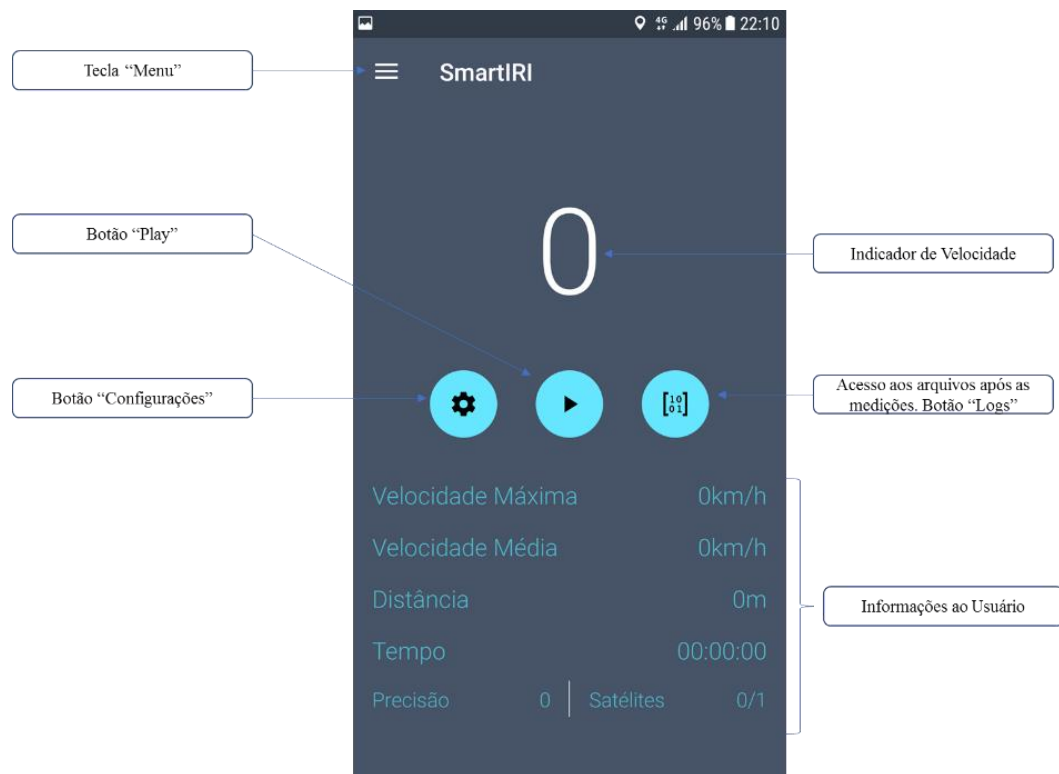


(b)

- **INICIANDO O APLICATIVO**

Ao iniciar, o aplicativo abrirá a tela de início, apresentada na (Figura 2), na qual constam as seguintes informações e funcionalidades:



**Figura 2:** Tela inicial do aplicativo

Iniciado o aplicativo, é necessário que o usuário aperte o botão “Configurações” para calibrar o aparelho na posição vertical. A seguinte tela é exibida para auxiliar o usuário na configuração da posição do dispositivo (Figura 3):

**Figura 3:** Tela de calibração do SmartIRI

O número na cor vermelha ou azul que aparece na Figura 3 corresponde ao valor da aceleração da gravidade, que, além de utilizada para a calibração do *smartphone*, também serve para calcular o valor do IRI.

O aplicativo, ainda nesta tela, fornece opções para medição em outros tipos de veículos (SUV e 4WD) e para outro tipo de via (Via Não Pavimentada), assim como classificação da via baseada na escala de Sayers e Karamihas (1998).

Essas funcionalidades só serão implementadas nas próximas atualizações do aplicativo.

- **INICIANDO E SALVANDO UMA MEDIÇÃO**

Efetuada a calibração do dispositivo, o usuário deve apertar na tecla “Menu” e em “Início”. Após essa etapa, para iniciar a medição é aconselhável que o usuário desenvolva a velocidade de medição sugerida. Dependendo do tipo e da localização da via, a velocidade recomendável varia entre 60 a 100 km/h. As melhores medições correspondem a velocidades próximas a 80 km/h.

Atingindo a velocidade recomendada deve-se aperta no botão “Play” que será modificado para o botão “Stop”, utilizado para parar a medição. Parando a medição os arquivos gerados estarão disponíveis no botão “Logs”. É importante que o usuário não interaja com o dispositivo enquanto o equipamento estiver efetuando uma medição.

- **ABRINDO OU EXPORTANDO UM ARQUIVO DE MEDIÇÃO**

Os arquivos gravados automaticamente após parada a medição com o uso do botão “Stop”, estarão disponíveis ao se apertar o botão “Logs” que pode ser acessado na tela inicial do aplicativo e também por meio da tecla “Menu”. Ao acessar os “logs” a seguinte tela é exibida (Figura 4).

**Figura 4:** Tela de “logs” do SmartIRI

O arquivo no formato .csv ao ser executado, abrirá no formato da Figura 5. As informações contidas no relatório são: a hora da medição, a velocidade média, as coordenadas, a distância percorrida, o valor do RMS e o valor do IRI. Todas essas informações são fornecidas a cada 100 m. Além dessas informações, o SmartIRI também fornece uma planilha resumo.

**Figura 5:** Arquivo .csv gerado pelo SmartIRI





HORA	VEL. MEDIA	CLASSIFICACAO	LAT_INICIO	LNG_INICIO	LAT_FINAL	LNG_FINAL	DISTANCIA	RMS	IRI
9:26:23	52.61	BOM	-3.780435342	-38.54122002	-3.78016351	-38.54209643	101	0.96	3.933
9:26:31	58.02	BOM	-3.780124212	-38.5422317	-3.779870684	-38.54306765	112	0.854	3.365
9:26:38	59.64	BOM	-3.779826851	-38.54320869	-3.7795657	-38.54406756	116	0.817	3.186
9:26:45	56.78	BOM	-3.779522657	-38.54420996	-3.779268047	-38.54502599	111	0.863	3.438
9:26:52	53.14	REGULAR	-3.779228347	-38.54515281	-3.778971186	-38.5459065	103	1.219	4.837
9:26:59	55.04	BOM	-3.778911127	-38.54603296	-3.77850246	-38.54675751	107	0.964	3.853
9:27:06	51.31	RUIM	-3.778429375	-38.54686679	-3.77794865	-38.54747029	100	1.567	6.196
9:27:13	49.69	RUIM	-3.778666408	-38.54756373	-3.777289173	-38.5482178	110	1.734	6.917
9:27:21	52.65	REGULAR	-3.777207423	-38.54831259	-3.776686171	-38.54891139	101	1.13	4.541
9:27:28	55.87	REGULAR	-3.776597984	-38.54901466	-3.776038965	-38.54964599	108	1.243	4.784
9:27:35	56.55	BOM	-3.775946855	-38.54974806	-3.775335123	-38.55033698	109	0.977	3.838
9:27:42	60.25	REGULAR	-3.775212573	-38.55041774	-3.774368647	-38.55073874	116	1.202	4.427
9:27:49	57.87	BOM	-3.774220201	-38.55076797	-3.773354258	-38.55077163	112	0.954	3.707
9:27:56	55.75	BOM	-3.773216408	-38.55074576	-3.772410058	-38.55050511	108	1.01	3.982
9:28:03	52.94	REGULAR	-3.772279364	-38.55046116	-3.771527868	-38.55020347	103	1.491	5.819

O arquivo .kml preferencialmente executado no *software Google Earth*, informará ao usuário em forma de mapa (Figura 6) o trecho analisado, demarcando o IRI a cada 100 m e seguindo uma escala bastante semelhante a do HDM-4 (Tabela 1).

**Figura 6:** Mapa gerado pelo SmartIRI



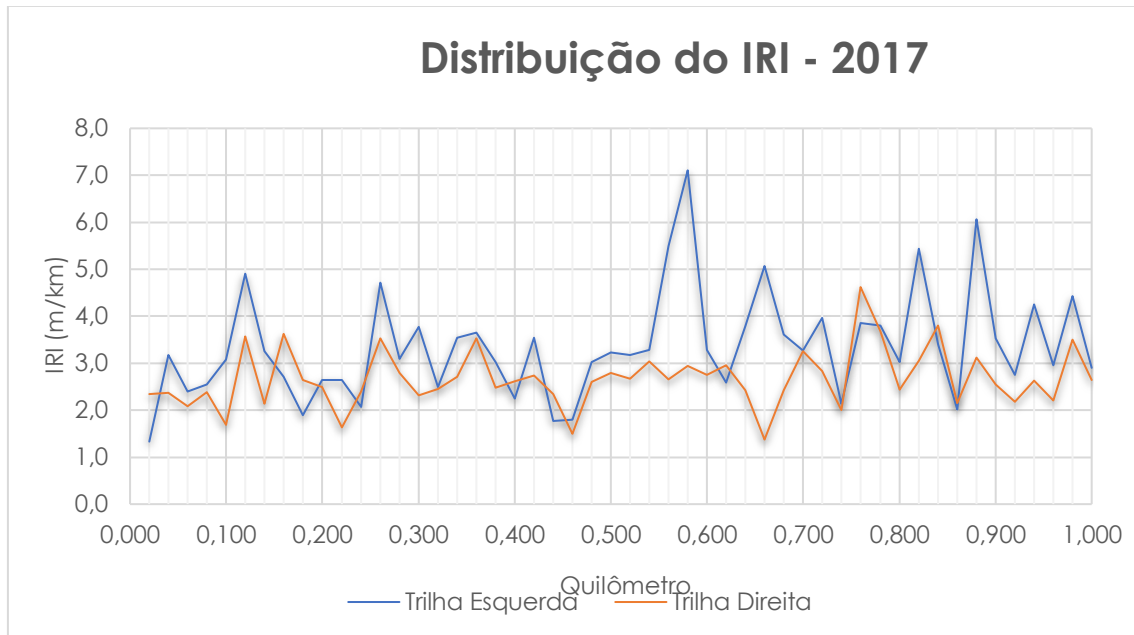
**Tabela 1:** Classificação proposta pelo SmartIRI.

Condições de Trafegabilidade	HDM-4 (m/km)	Condições de Trafegabilidade	SmartIRI (m/km)	Legenda de Cores
Boa	$IRI \leq 2$	Excelente	$0 < IRI < 2$	
Regular	$2 < IRI \leq 4$	Boa	$2 \leq IRI < 4$	
Ruim	$4 \leq IRI \leq 6$	Regular	$4 \leq IRI < 6$	
Péssimo	$6 < IRI$	Ruim	$6 \leq IRI$	

## ANEXOS

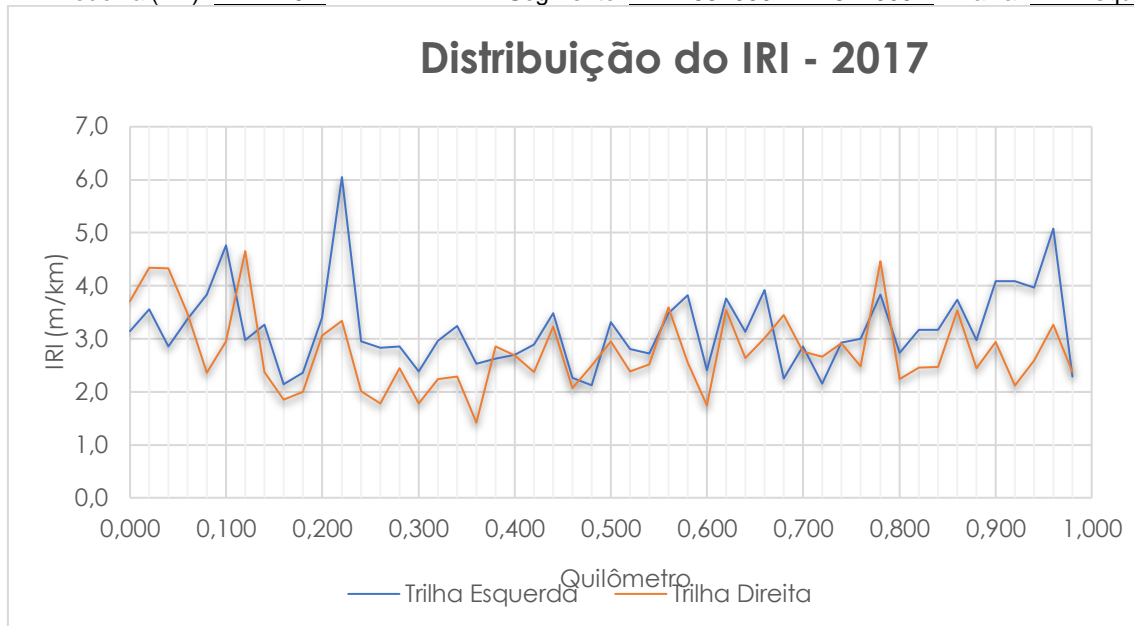
### ANEXO A – LEVANTAMENTO DO TRECHO LOCALIZADO NA BR-020 – TRECHO EXPERIMENTAL DNIT

Trecho Teste N°: UA (13)      Unidade Federal: CEARÁ      Data: 19/04/2017  
 Rodovia (BR): BR-20      Segmento: km 86+000 - km 87+000      Faixa: Direita



UA 13 - Faixa Direita				
km Inicial	km Final	IRI - Trilha Esq. (m/km)	IRI - Trilha Dir. (m/km)	Velocidade (km/h)
0,000	0,020	1,3	2,3	60,3
0,020	0,040	3,2	2,4	60,7
0,040	0,060	2,4	2,1	62,5
0,060	0,080	2,5	2,4	62,9
0,080	0,100	3,1	1,7	61,1
0,100	0,120	4,9	3,6	59,9
0,120	0,140	3,3	2,1	61,8
0,140	0,160	2,7	3,6	62,5
0,160	0,180	1,9	2,6	63,2
0,180	0,200	2,6	2,5	64,2
0,200	0,220	2,6	1,6	64,3
0,220	0,240	2,1	2,4	65,4
0,240	0,260	4,7	3,5	65,0
0,260	0,280	3,1	2,8	63,0
0,280	0,300	3,8	2,3	62,8
0,300	0,320	2,5	2,5	60,9
0,320	0,340	3,5	2,7	61,9
0,340	0,360	3,7	3,5	62,7

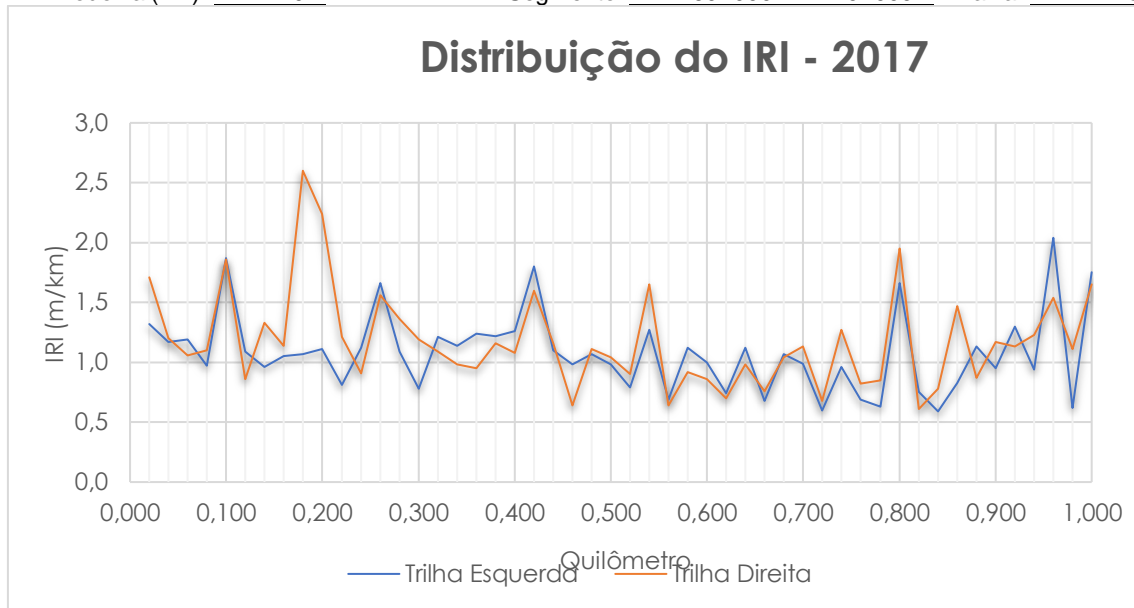
<b>UA 13 - Faixa Direita</b>				
<b>km Inicial</b>	<b>km Final</b>	<b>IRI - Trilha Esq. (m/km)</b>	<b>IRI - Trilha Dir. (m/km)</b>	<b>Velocidade (km/h)</b>
0,360	0,380	3,0	2,5	60,8
0,380	0,400	2,2	2,6	61,1
0,400	0,420	3,5	2,7	60,1
0,420	0,440	1,8	2,3	61,3
0,440	0,460	1,8	1,5	60,5
0,460	0,480	3,0	2,6	60,6
0,480	0,500	3,2	2,8	61,4
0,500	0,520	3,2	2,7	63,6
0,520	0,540	3,3	3,0	63,5
0,540	0,560	5,5	2,7	61,6
0,560	0,580	7,1	2,9	62,8
0,580	0,600	3,3	2,8	61,6
0,600	0,620	2,6	3,0	61,9
0,620	0,640	3,8	2,4	62,0
0,640	0,660	5,1	1,4	61,1
0,660	0,680	3,6	2,4	61,1
0,680	0,700	3,3	3,3	59,4
0,700	0,720	4,0	2,8	60,4
0,720	0,740	2,1	2,0	59,0
0,740	0,760	3,9	4,6	58,2
0,760	0,780	3,8	3,7	58,2
0,780	0,800	3,0	2,4	61,5
0,800	0,820	5,4	3,1	60,7
0,820	0,840	3,4	3,8	62,0
0,840	0,860	2,0	2,2	59,4
0,860	0,880	6,1	3,1	59,1
0,880	0,900	3,5	2,5	57,9
0,900	0,920	2,8	2,2	57,6
0,920	0,940	4,2	2,6	57,7
0,940	0,960	3,0	2,2	58,2
0,960	0,980	4,4	3,5	55,8
0,980	1,000	2,9	2,6	58,7

Trecho Teste N°: UA (13)Unidade Federal: CEARÁData: 19/04/2017Rodovia (BR): BR-20Segmento: km 86+000 - km 87+000Faixa: Esquerda

<b>UA 13 - Faixa Esquerda</b>				
<b>km Inicial</b>	<b>km Final</b>	<b>IRI - Trilha Esq. (m/km)</b>	<b>IRI - Trilha Dir. (m/km)</b>	<b>Velocidade (km/h)</b>
1,000	0,980	2,3	2,4	61,8
0,980	0,960	5,1	3,3	62,9
0,960	0,940	4,0	2,6	62,3
0,940	0,920	4,1	2,1	62,7
0,920	0,900	4,1	2,9	63,1
0,900	0,880	3,0	2,4	65,9
0,880	0,860	3,7	3,5	65,3
0,860	0,840	3,2	2,5	67,2
0,840	0,820	3,2	2,5	69,0
0,820	0,800	2,7	2,2	66,3
0,800	0,780	3,8	4,5	66,5
0,780	0,760	3,0	2,5	67,4
0,760	0,740	2,9	2,9	66,0
0,740	0,720	2,2	2,7	67,6
0,720	0,700	2,9	2,8	66,7
0,700	0,680	2,3	3,4	65,4
0,680	0,660	3,9	3,0	66,4
0,660	0,640	3,1	2,6	67,7
0,640	0,620	3,8	3,5	67,4
0,620	0,600	2,4	1,7	68,3
0,600	0,580	3,8	2,6	66,3
0,580	0,560	3,5	3,6	64,5
0,560	0,540	2,7	2,5	63,9
0,540	0,520	2,8	2,4	64,6
0,520	0,500	3,3	2,9	65,0

UA 13 - Faixa Esquerda				
km Inicial	km Final	IRI - Trilha Esq. (m/km)	IRI - Trilha Dir. (m/km)	Velocidade (km/h)
0,500	0,480	2,1	2,5	66,7
0,480	0,460	2,3	2,1	66,7
0,460	0,440	3,5	3,2	65,6
0,440	0,420	2,9	2,4	65,8
0,420	0,400	2,7	2,7	62,7
0,400	0,380	2,6	2,9	64,6
0,380	0,360	2,5	1,4	64,9
0,360	0,340	3,2	2,3	65,5
0,340	0,320	3,0	2,2	63,9
0,320	0,300	2,4	1,8	64,3
0,300	0,280	2,9	2,4	65,0
0,280	0,260	2,8	1,8	64,7
0,260	0,240	2,9	2,0	65,1
0,240	0,220	6,1	3,3	65,7
0,220	0,200	3,4	3,1	64,8
0,200	0,180	2,4	2,0	66,2
0,180	0,160	2,1	1,8	65,2
0,160	0,140	3,3	2,4	66,5
0,140	0,120	3,0	4,7	64,9
0,120	0,100	4,8	2,9	65,3
0,100	0,080	3,8	2,4	63,9
0,080	0,060	3,4	3,5	64,0
0,060	0,040	2,9	4,3	61,6
0,040	0,020	3,6	4,3	60,4
0,020	0,000	3,1	3,7	60,4



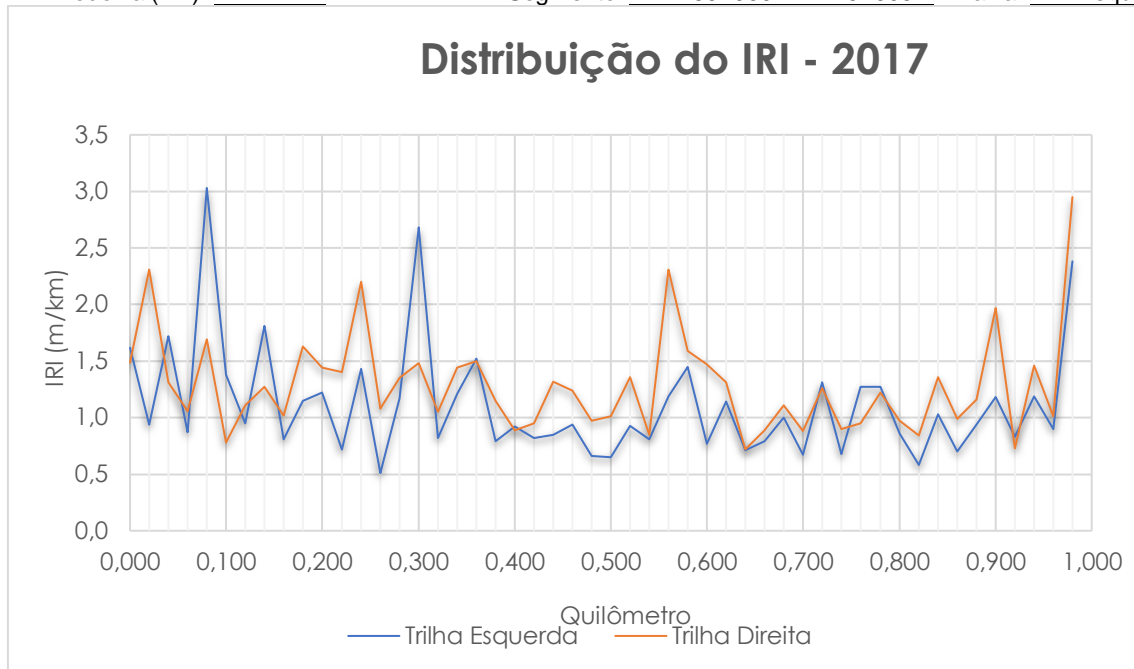
Trecho Teste N°: UA (14)Unidade Federal: CEARÁData: 19/04/2017Rodovia (BR): BR-20Segmento: km 69+000 - km 70+000Faixa: Direita

UA 14 - Faixa Direita				
km Inicial	km Final	IRI - Trilha Esq. (m/km)	IRI - Trilha Dir. (m/km)	Velocidade (km/h)
0,000	0,020	1,3	1,7	67,3
0,020	0,040	1,2	1,2	66,9
0,040	0,060	1,2	1,1	66,2
0,060	0,080	1,0	1,1	67,3
0,080	0,100	1,9	1,9	67,6
0,100	0,120	1,1	0,9	67,3
0,120	0,140	1,0	1,3	68,4
0,140	0,160	1,1	1,1	68,7
0,160	0,180	1,1	2,6	68,5
0,180	0,200	1,1	2,2	67,6
0,200	0,220	0,8	1,2	67,1
0,220	0,240	1,1	0,9	67,5
0,240	0,260	1,7	1,6	67,9
0,260	0,280	1,1	1,4	68,7
0,280	0,300	0,8	1,2	69,2
0,300	0,320	1,2	1,1	69,8
0,320	0,340	1,1	1,0	69,4
0,340	0,360	1,2	1,0	69,6
0,360	0,380	1,2	1,2	69,8
0,380	0,400	1,3	1,1	70,1
0,400	0,420	1,8	1,6	69,1
0,420	0,440	1,1	1,2	68,8
0,440	0,460	1,0	0,6	68,5
0,460	0,480	1,1	1,1	68,5
0,480	0,500	1,0	1,0	66,5
0,500	0,520	0,8	0,9	65,7

<b>UA 14 - Faixa Direita</b>				
<b>km Inicial</b>	<b>km Final</b>	<b>IRI - Trilha Esq. (m/km)</b>	<b>IRI - Trilha Dir. (m/km)</b>	<b>Velocidade (km/h)</b>
0,520	0,540	1,3	1,7	66,5
0,540	0,560	0,7	0,6	65,4
0,560	0,580	1,1	0,9	64,0
0,580	0,600	1,0	0,9	63,2
0,600	0,620	0,7	0,7	64,2
0,620	0,640	1,1	1,0	64,0
0,640	0,660	0,7	0,8	63,3
0,660	0,680	1,1	1,0	63,4
0,680	0,700	1,0	1,1	63,1
0,700	0,720	0,6	0,7	63,1
0,720	0,740	1,0	1,3	62,5
0,740	0,760	0,7	0,8	64,3
0,760	0,780	0,6	0,9	64,8
0,780	0,800	1,7	2,0	65,6
0,800	0,820	0,8	0,6	64,5
0,820	0,840	0,6	0,8	66,0
0,840	0,860	0,8	1,5	64,3
0,860	0,880	1,1	0,9	65,4
0,880	0,900	1,0	1,2	64,8
0,900	0,920	1,3	1,1	64,5
0,920	0,940	0,9	1,2	65,6
0,940	0,960	2,0	1,5	65,0
0,960	0,980	0,6	1,1	65,1
0,980	1,000	1,8	1,7	64,2

Trecho Teste N°: UA (14)Unidade Federal: CEARÁData: 19/04/2017

Rodovia (BR): \_\_\_\_\_

Segmento: km 69+000 - km 70+000Faixa: Esquerda

<b>UA 14 - Faixa Esquerda</b>				
km Inicial	km Final	IRI - Trilha Esq. (m/km)	IRI - Trilha Dir. (m/km)	Velocidade (km/h)
1,000	0,980	2,4	3,0	65,7
0,980	0,960	0,9	1,0	65,8
0,960	0,940	1,2	1,5	65,7
0,940	0,920	0,8	0,7	66,5
0,920	0,900	1,2	2,0	65,7
0,900	0,880	0,9	1,2	65,3
0,880	0,860	0,7	1,0	64,3
0,860	0,840	1,0	1,4	65,4
0,840	0,820	0,6	0,8	65,0
0,820	0,800	0,9	1,0	63,7
0,800	0,780	1,3	1,2	63,5
0,780	0,760	1,3	1,0	62,5
0,760	0,740	0,7	0,9	62,9
0,740	0,720	1,3	1,3	63,5
0,720	0,700	0,7	0,9	63,4
0,700	0,680	1,0	1,1	63,8
0,680	0,660	0,8	0,9	63,9
0,660	0,640	0,7	0,7	64,0
0,640	0,620	1,1	1,3	63,8
0,620	0,600	0,8	1,5	64,6
0,600	0,580	1,5	1,6	65,0
0,580	0,560	1,2	2,3	63,9
0,560	0,540	0,8	0,9	64,5
0,540	0,520	0,9	1,4	64,7

<b>UA 14 - Faixa Esquerda</b>				
<b>km Inicial</b>	<b>km Final</b>	<b>IRI - Trilha Esq. (m/km)</b>	<b>IRI - Trilha Dir. (m/km)</b>	<b>Velocidade (km/h)</b>
0,520	0,500	0,7	1,0	63,7
0,500	0,480	0,7	1,0	61,8
0,480	0,460	0,9	1,2	62,1
0,460	0,440	0,9	1,3	63,0
0,440	0,420	0,8	1,0	63,3
0,420	0,400	0,9	0,9	62,0
0,400	0,380	0,8	1,2	62,3
0,380	0,360	1,5	1,5	61,7
0,360	0,340	1,2	1,4	61,4
0,340	0,320	0,8	1,1	61,3
0,320	0,300	2,7	1,5	61,1
0,300	0,280	1,2	1,4	62,4
0,280	0,260	0,5	1,1	62,0
0,260	0,240	1,4	2,2	63,2
0,240	0,220	0,7	1,4	61,6
0,220	0,200	1,2	1,4	63,2
0,200	0,180	1,2	1,6	62,1
0,180	0,160	0,8	1,0	62,1
0,160	0,140	1,8	1,3	63,0
0,140	0,120	1,0	1,1	62,6
0,120	0,100	1,4	0,8	61,9
0,100	0,080	3,0	1,7	61,6
0,080	0,060	0,9	1,1	61,8
0,060	0,040	1,7	1,3	61,5
0,040	0,020	0,9	2,3	61,6
0,020	0,000	1,6	1,5	61,6

**ANEXO B – LEVANTAMENTO DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL  
REALIZADO NA BR-020 – SEGMENTO COM EXECUÇÃO DE REMENDOS**

<b>UF</b>	<b>BR</b>	<b>km Inicial</b>	<b>km Final</b>	<b>IRI(m/km)</b>	<b>Flecha(mm)</b>	<b>DATA</b>
CE	020	400,060	400,160	2,20	5,02	15/07/2017
CE	020	400,161	400,260	1,88	6,42	15/07/2017
CE	020	400,261	400,361	1,90	5,57	15/07/2017
CE	020	400,361	400,460	2,21	4,93	15/07/2017
CE	020	400,461	400,561	2,72	4,51	15/07/2017
CE	020	400,562	400,662	3,14	4,09	15/07/2017
CE	020	400,663	400,763	3,09	4,40	15/07/2017
CE	020	400,763	400,863	2,86	6,74	15/07/2017
CE	020	400,863	400,963	2,45	5,32	15/07/2017
CE	020	400,963	401,063	4,29	6,01	15/07/2017
CE	020	401,063	401,163	5,21	5,28	15/07/2017
CE	020	401,163	401,263	3,69	8,00	15/07/2017
CE	020	401,263	401,363	3,79	5,09	15/07/2017
CE	020	401,363	401,463	3,57	6,12	15/07/2017
CE	020	401,463	401,563	2,99	5,35	15/07/2017
CE	020	401,563	401,663	2,99	7,33	15/07/2017
CE	020	401,663	401,763	3,20	6,06	15/07/2017
CE	020	401,763	401,863	2,71	9,11	15/07/2017
CE	020	401,863	401,963	3,10	7,63	15/07/2017
CE	020	401,963	402,063	3,15	5,61	15/07/2017
CE	020	402,063	402,163	3,13	8,54	15/07/2017
CE	020	402,163	402,263	3,44	5,85	15/07/2017
CE	020	402,263	402,363	3,38	6,08	15/07/2017
CE	020	402,363	402,463	3,47	5,70	15/07/2017
CE	020	402,463	402,563	3,29	7,36	15/07/2017
CE	020	402,563	402,663	3,83	8,86	15/07/2017
CE	020	402,663	402,763	3,93	6,92	15/07/2017
CE	020	402,763	402,863	2,87	5,79	15/07/2017
CE	020	402,863	402,963	2,55	5,21	15/07/2017
CE	020	402,963	403,062	2,59	7,31	15/07/2017
CE	020	403,063	403,162	3,32	5,93	15/07/2017
CE	020	403,163	403,263	3,29	4,62	15/07/2017
CE	020	403,263	403,363	2,65	5,99	15/07/2017
CE	020	403,363	403,463	3,37	7,16	15/07/2017
CE	020	403,463	403,563	3,35	7,46	15/07/2017
CE	020	403,563	403,663	2,71	7,55	15/07/2017
CE	020	403,663	403,763	2,81	5,83	15/07/2017
CE	020	403,763	403,863	3,18	6,12	15/07/2017
CE	020	403,863	403,963	3,32	7,11	15/07/2017
CE	020	403,963	404,063	3,46	7,76	15/07/2017