

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**FERNANDA DO AMARAL FERRARI**

**AVALIAÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS COM  
USO DE PERFILÔMETRO INERCIAL A LASER E *SMARTPHONE***

**Alegrete  
2021**

**FERNANDA DO AMARAL FERRARI**

**AVALIAÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS COM  
USO DE PERFILÔMETRO INERCIAL A LASER E *SMARTPHONE***

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título  
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Mauricio Silveira dos  
Santos

Coorientador: Prof. D.Sc. Diego Arthur  
Hartmann

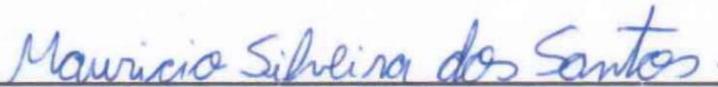
**Alegrete  
2021**

FERNANDA DO AMARAL FERRARI  
AVALIAÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS COM  
USO DE PERFILÔMETRO INERCIAL A LASER E SMARTPHONE

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título  
de Bacharel em Engenharia Civil.

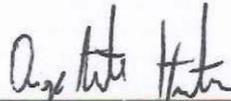
Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 03, maio de 2021.

Banca examinadora:



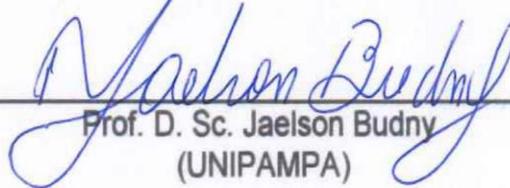
Prof. Me. Mauricio Silveira dos Santos

Orientador  
(UNIPAMPA)



Prof. D. Sc. Diego Arthur Hartmann

Coorientador  
(UNIPAMPA)



Prof. D. Sc. Jaelson Budny  
(UNIPAMPA)



Prof. Dr. Lucas Dotto Bueno  
(UFSM)

## RESUMO

Ao considerar que a malha viária está cada vez mais precária e necessita de reparos, este estudo tem como objetivo avaliar a irregularidade longitudinal do pavimento com uso de um perfilômetro inercial a laser e um *smartphone*. O uso de aparelhos celulares surge como uma alternativa de baixo custo e acessível para estudar a irregularidade longitudinal. Como os equipamentos disponíveis para este tipo de avaliação geralmente são dispendiosos, alguns autores já trabalham com o uso do *smartphone* como alternativa para auxiliar os órgãos rodoviários, principalmente dentro do sistema de gerência dos pavimentos. Assim, nesse trabalho a avaliação da irregularidade longitudinal foi realizada em 6 vias localizadas em Alegrete e Santa Maria, ambas cidades do estado do Rio Grande do Sul. Cada trecho foi percorrido 10 vezes com o perfilômetro inercial a laser e dois *smartphones* com os aplicativos SensorLab e SmartIRI, em dois carros diferentes, a fim de se obter uma média dos valores de IRI e RMSVA para cada pavimento. Após o levantamento de dados e tratamento dos resultados obtidos, pode-se considerar que os perfis longitudinais de ambos os métodos utilizados são similares. Da mesma forma, as médias de valores finais encontrados entre os aplicativos e o perfilômetro inercial a laser gerou, para os trechos avaliados, um mesmo valor na escala IRI. Assim, é possível considerar que os objetivos propostos neste trabalho foram alcançados, contudo, ainda se faz necessário mais estudos que correlacionem dados encontrados com uso do perfilômetro inercial a laser e dos aplicativos, bem como a eficiência dos *smartphones* em medir a irregularidade longitudinal do pavimento.

Palavras-Chave: *Smartphone*, irregularidade longitudinal, pavimento, perfilômetro inercial a laser.

## ABSTRACT

By considering that the road network is in a precarious state and in need of repairs, this study has as objective measure the longitudinal irregularity from the pavement utilizing a inertial profilometer and a smartphone. The use of cellphone devices emerge as a cheap, acessible alternative to the avaliation of roughness. As the equipment available for such measurement are usually costly, some authors already work with a smartphone as an alternative to auxiliare road departments, mainly in pavement management systems. Thus, in this work the measurement of roughness was done in six streets located in Alegrete and Santa Maria, both cities from the state of Rio Grande do Sul. Each street was crossed 10 times utilizing a inertial profilometer and 2 smartphones with the applications SensorLab and SmartIRI, in two diferente vehicles, in order to obtain the average from the IRI and RMSVA values fom each pavement. After the data survey and data treatment from the obtained data, it can be consider that the longitudinal profiles, from both methods are similar. In the same way, the average from the results obtained between the applications and laser inertial profilometer generated the same value on the IRI scale for the measured streets. As such, it can be consider that the proposed objectives in this study where achieved, however, it is still necessary more research to correlate the data obtained from the inertial profilometer and the aplications, as well as the efficiency of the smartphone in measuring the roughness of the pavement.

Keywords: *Smartphone*, roughness, pavement, inertial profilometer.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura do Sistema de Gerência do Pavimento .....	15
Figura 2 – Detalhe de um perfil longitudinal .....	18
Figura 3 – Escala IRI .....	21
Figura 4 – Perfilômetro inercial a laser .....	24
Figura 5 – Diagrama do processamento de dados de aceleração .....	29
Figura 6 – Fluxograma da metodologia .....	30
Figura 7 – Aparelhos devidamente fixados no painel do veículo.....	31
Figura 8 – Localização da Avenida Tiarajú, Alegrete/RS .....	32
Figura 9 – Condições atuais da Avenida Tiaraju .....	32
Figura 10 – Localização da Avenida Eurípedes Brasil Milano, Alegrete/RS .....	33
Figura 11 – Condições atuais da Avenida Eurípedes Brasil Milano .....	33
Figura 12 – Localização da Rua Barros Cassal .....	34
Figura 13 – Condições atuais da Rua Barros Cassal.....	34
Figura 14 – Localização do Trecho 1 .....	35
Figura 15 – Condições atuais da Trecho 1 de Santa Maria .....	35
Figura 16 – Localização do Trecho 2 .....	36
Figura 17 – Condições do Trecho 2 .....	36
Figura 18 – Localização do trecho da BR 287.....	37
Figura 19 – Condições do trecho BR 287 .....	37
Figura 20 – Ciberlaser acoplado no veículo utilizado para estudo .....	38
Figura 21 – Parâmetros para cálculo do IRI .....	39
Figura 22 – Interface do aplicativo SmartIRI .....	40
Figura 23 – Tela do aplicativo SensorLab .....	42
Figura 24 – Indicação dos eixos no aplicativo SensorLab.....	43
Figura 25 – Perfil longitudinal Trecho 1.....	48
Figura 26 – Perfis longitudinais para o Trecho 1 .....	49
Figura 27 – Correlações entre IRI e RMSVA Trecho 1 .....	51
Figura 28 – Perfil Longitudinal Trecho 2.....	52
Figura 29 – Perfis longitudinais para o Trecho 2.....	53
Figura 30 – Perfil longitudinal com dados do aplicativo SmartIRI para o Trecho 2 ...	54
Figura 31 – Correlação entre IRI e RMSVA Trecho 2 .....	55
Figura 32 – Perfil longitudinal Trecho BR 287 .....	56
Figura 33 – Perfis longitudinais para o Trecho BR 287 .....	57
Figura 34 – Correlação entre IRI e RMSVA Trecho BR 287 .....	58
Figura 35 – Perfis longitudinais para Av. Eurípedes Brasil Milano .....	59
Figura 36 – Correlação entre IRI e RMSVA Av. Eurípedes Brasil Milano .....	60
Figura 37 – Perfis longitudinais para a Av. Tiarajú .....	61
Figura 38 – Correlação entre IRI e RMSVA Av. Tiarajú .....	62
Figura 39 – Perfis longitudinais para a Rua Barros Cassal .....	63
Figura 40 – Correlação entre IRI e RMSVA Rua Barros Cassal .....	64
Figura 41 – Captura de imagem Trecho 1 .....	66
Figura 42 – Captura de imagem Av. Tiarajú.....	66
Figura 43 – Captura de imagem Trecho 2.....	67
Figura 44 – Captura de imagem Trecho BR 287.....	67
Figura 45 – Captura de imagem Av. Eurípedes Brasil Milano .....	67
Figura 46 – Captura de imagem Rua Barros Cassal.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Conceito de trafegabilidade IRI e QI.....	21
Tabela 2 – Conceito de trafegabilidade IRI .....	22
Tabela 3 – Escala IRI com base na ASTM E1926e IRI.....	22
Tabela 4 – Classificação proposta pelo SmartIRI.....	41
Tabela 5 – Tabela acelerômetro gerada em levantamento teste pelo aplicativo SensorLab .....	45
Tabela 6 – Médias Trecho 1 .....	50
Tabela 7 – Médias Trecho 2.....	54
Tabela 8 – Médias Trecho BR 287.....	57
Tabela 9 – Médias da Av. Eurípedes Brasil Milano .....	60
Tabela 10 – Médias da Avenida Tiarajú .....	61
Tabela 11 – Médias para a Rua Barros Cassal.....	63
Tabela 12 – Médias para todos os trechos de estudo.....	65
Tabela 13 – Velocidade dos pavimentos estudados .....	69
Tabela 14 – Equações, R <sup>2</sup> e R para os trechos estudados .....	70

## LISTA DE SIGLAS

ASTM: *“American Society for Testing and Materials”*

ATR: Afundamento em Trilha de Roda

CNT: Confederação Nacional de Transportes

DAER: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

GPS: *“Global Positioning System”*

HDM – 4: *“Highway Development and Management Tool”*

IGGE: Índice de Gravidade Global Expedito

IPR: Instituto de Pesquisas Rodoviárias

IRI: *“International Roughness Index”*

LVC: Levantamento Visual Contínuo

QI: Quociente de Irregularidade

RMS: *“Root Mean Square”*

RMSVA: *“Root Mean Square Vertical Acceleration”*

SGP: Sistema de Gerência de Pavimentos

VSA: Valor de Serventia Atual

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1 Objetivos.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2 Justificativa.....</b>	<b>12</b>
<b>1.3 Estrutura do Trabalho .....</b>	<b>13</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP).....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 Irregularidade Longitudinal do Pavimento.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.1 Perfilômetro Inercial a Laser .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.2 Smartphone: Medidor do Tipo Resposta .....</b>	<b>26</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1 Materiais.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1.1 Perfilômetro Inercial a Laser .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1.3 Aplicativo SensorLab.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.1 Primeira etapa.....</b>	<b>43</b>
<b>3.2.2 Segunda etapa.....</b>	<b>44</b>
<b>3.3 Processamento de Dados.....</b>	<b>44</b>
<b>4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>48</b>
<b>4.1 Resultados de Santa Maria.....</b>	<b>48</b>
<b>4.1.1 Trecho 1 .....</b>	<b>48</b>
<b>4.1.2 Trecho 2 .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1.3 Trecho BR 287 .....</b>	<b>56</b>
<b>4.2 Resultados de Alegrete.....</b>	<b>59</b>
<b>4.2.1 Avenida Eurípedes Brasil Milano .....</b>	<b>59</b>
<b>4.2.2 Avenida Tiarajú.....</b>	<b>61</b>
<b>4.2.3 Rua Barros Cassal .....</b>	<b>62</b>
<b>4.3 Análise dos Resultados .....</b>	<b>64</b>
<b>6. Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Quando se trata da qualidade do pavimento rodoviário a avaliação do usuário é de grande importância. De acordo com a Pesquisa CNT de Rodovias 2016, quase 50% das rodovias avaliadas apresentaram algum problema no pavimento, classificadas como regular, ruim ou péssimo (CNT, 2017).

Em uma pesquisa realizada em 2018 por Augusti e Bianchini (2019), que avaliou a condição da malha viária das estradas do Rio Grande do Sul sob jurisdição do DAER, foi verificado que quase 55% dos pavimentos estão em condições ruins, devido a reparos, panelas e trincas. A pesquisa concluiu que muito se deve ao envelhecimento das estradas e da manutenção que está aquém da necessidade, que compromete a funcionalidade do pavimento e contribui para que em até 10 anos 23% da rede apresente problemas estruturais, o que é ainda mais grave.

Para uma correta avaliação do pavimento e soluções assertivas, é preciso um estudo quanto ao nível de precariedade. Ao se projetar uma rodovia, por exemplo, leva-se em conta um determinado período de duração da vida útil do pavimento. De acordo com o DNIT (2011), o ciclo de vida do pavimento vai de uma condição ótima até alcançar uma condição ruim, se degradando ao longo do tempo.

Dessa maneira deve-se conhecer o momento certo para que a manutenção seja feita. Para isso existe o Sistema de Gerenciamento dos Pavimentos, que considera três fatores para a tomada de decisão, o desempenho funcional, o desempenho estrutural e o desempenho operacional e da segurança (DNIT, 2011).

Este trabalho está direcionado para a análise do desempenho funcional do pavimento. Para Bernucci *et al.* (2010) a avaliação funcional está relacionada com a apreciação da superfície e como esta influencia no conforto ao rolamento.

Segundo a CNT (2017) existem duas técnicas para avaliação funcional, a objetiva, que gera uma quantificação numérica quanto a severidade dos defeitos, e uma subjetiva, que determina o estado da degradação a partir de conceitos qualitativos.

Neste estudo a funcionalidade será investigada com base na irregularidade longitudinal do pavimento. Para o DNIT (2011) a avaliação do IRI (*International Roughness Index*) e de outros defeitos da superfície do pavimento são os mais apropriados para a definição da condição funcional da via, que deve ser restaurada

quando atingir determinado nível, assim como é a característica que mais afeta o julgamento dos usuários.

Paterson (1987) explica que a irregularidade é uma característica do perfil longitudinal dos pavimentos, são desvios da superfície plana, um defeito baseado na ideia de que o pavimento ideal é aquele com irregularidade longitudinal zero.

De acordo com Bernucci *et al.* (2010), esta irregularidade pode ser obtida com medidas topográficas ou equipamentos que mensuram o perfil longitudinal com ou sem contato, ou ainda através de uma avaliação indireta por mecanismos do tipo resposta.

Contudo, entre as opções, é necessário buscar alternativas para a avaliação da irregularidade longitudinal, com equipamentos mais acessíveis economicamente e que também gerem dados que permitam um tratamento rápido e fácil, a fim de auxiliar na tomada de decisão dentro do processo de gerenciamento dos pavimentos.

Almeida (2018) afirma que, devido aos sensores existentes nos aparelhos, os *smartphones* podem ser uma alternativa na hora de estimar a condição da superfície quando se trata de irregularidade e conforto ao rolamento por parte dos usuários, devido à ação da aceleração vertical.

Por fazer uso de um método prático, os levantamentos poderão ser mais frequentes e, futuramente, o uso de aplicativos em *smartphones* pode colaborar com os órgãos gestores rodoviários (DUARTE *et al.*, 2019). Ainda, com o avanço tecnológico dos aplicativos, é possível visualizar um cenário onde os próprios usuários poderão contribuir com a melhoria das vias, com a geração de dados em tempo real e envio para os órgãos responsáveis através da internet.

Indícios de que essa já é uma alternativa são os estudos de Bisconsini (2016) e outros autores que serão falados neste trabalho, principalmente nos países em que há pouco investimento direcionado para o setor rodoviário.

Sendo assim, esta é uma metodologia nova e mais estudos são necessários para que o uso do *smartphone* como equipamento de avaliação do pavimento seja considerado eficaz, e possa ser comparado com outros aparelhos já consagrados.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar as condições funcionais de trechos de pavimentos na cidade de Alegrete - RS observando a irregularidade do pavimento com uso de um *smartphone*.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- a. Avaliar trechos de pavimentos de Alegrete/RS e Santa Maria/RS com relação à irregularidade longitudinal e a sua necessidade de manutenção.
- b. Fazer um comparativo entre os métodos de avaliação da irregularidade, o perfilômetro inercial a laser, o aplicativo SensorLab e o aplicativo SmartIRI.
- c. Avaliar a eficiência do uso do *smartphone* (especificamente dos aplicativos SensorLab e SmartIRI) em produzir dados que representem o índice de irregularidade longitudinal obtido pelo perfilômetro inercial a laser.

## 1.2 Justificativa

A irregularidade longitudinal do pavimento afeta não só o conforto do usuário como também a sua segurança. Avaliar este desempenho funcional se torna importante no momento em que se percebe que há índices aceitáveis ou não para a tráfegabilidade.

Reparar um pavimento que já está com um índice de degradação acelerado prejudica o sistema fazendo com que outros trechos da malha viária também fiquem comprometidos.

Além disso, o que motiva esta pesquisa é a utilização dos *smartphones* como equipamento de medição de IRI. Afinal, eles são uma alternativa barata na obtenção de dados do pavimento e também são objetos de fácil manutenção, o que facilita e acelera o processo de avaliação do pavimento.

### **1.3 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho é composto por cinco capítulos. Sendo que no primeiro consta a contextualização do tema, os objetivos gerais e específicos e a justificativa. No segundo capítulo está apresentada a revisão de literatura que discute o Sistema de Gerência de Pavimentos e a irregularidade longitudinal do pavimento.

No capítulo três estão descritos os materiais e métodos que foram utilizados nesta pesquisa, com ênfase no levantamento de dados através de um *smartphone* e do perfilômetro inercial a laser. No quarto capítulo está a apresentação e análise dos resultados e, por fim, no capítulo cinco estão as considerações finais.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP)**

Ao longo dos anos 1980, os órgãos rodoviários se voltaram para a aplicação do Sistema de Gerência de Pavimento (SGP), criado por iniciativa do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), devido ao envelhecimento das redes rodoviárias brasileiras, aos elevados custos operacionais de manutenção dos veículos, a maior racionalização cobrada pelas agências financiadoras, entre outros fatores (DNIT, 2011).

Conceitualmente o Sistema de Gerência de Pavimentos é composto pelo planejamento, projeto, construção e manutenção<sup>1</sup> dos pavimentos, que devem agir mutuamente (DNIT, 2011). Com o objetivo de reger melhor os recursos públicos e garantir a segurança do usuário.

Um sistema eficiente consegue manter uma frequência de conservação nas estradas, avaliando corretamente os trechos que necessitam de atenção. Visconti (2000) aponta que quando um pavimento é restaurado no momento adequado ele poderá exigir apenas uma camada fina de recapeamento acima da estrutura atual, com baixo custo. Contudo, se é esperado atingir uma condição excessivamente deteriorada, a restauração poderá exigir serviços com custos até três vezes maiores.

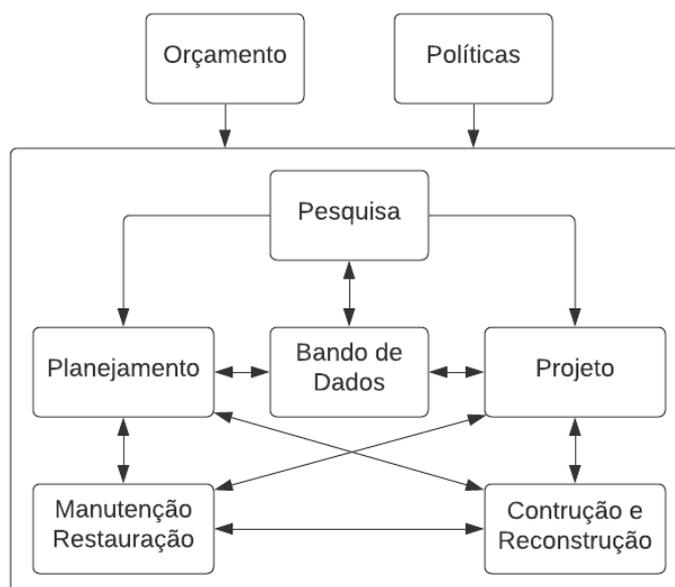
Para o DNIT (2011), o grau de deterioração em que um pavimento se encontra depende de muitos fatores que agem concomitantemente, como por exemplo a qualidade do projeto executado, questões relacionadas com o local em que o trecho se encontra, questões climáticas e ocupação humana.

Estes itens são compreendidos pelo SGP a fim de traçar a melhor estratégia. A Figura 1 ilustra como o SGP é estruturado.

---

<sup>1</sup> Manutenção: Especificamente quanto ao pavimento, constituiu-se de atividades de restauração, que visam melhorar periodicamente as condições estruturais e funcionais do mesmo (DNIT, 2011).

Figura 1 – Estrutura do Sistema de Gerência do Pavimento



Fonte: DNIT (2011)

A estrutura se apresenta com a criação de um banco de dados no qual estão as informações básicas da rede de pavimentos. De acordo com o DNIT (2011) nestes dados se encontram quando e como foi realizado o projeto de cada trecho, datas e detalhes da execução de sua construção e/ou reconstrução, além do planejamento para uma coleta de dados efetiva. Isso tudo para determinar as prioridades em caso de manutenção e também, para organização financeira.

Ainda, a CNT (2017) reforça que algumas informações devem ser inseridas no SGP, como: o planejamento de novas obras de pavimentação, os projetos das rodovias existentes, o acompanhamento das atividades de manutenção e restauração executadas, e as operações de construção e reconstrução de pavimento.

Em síntese, o SGP possui um banco de dados que está agrupado em quatro grandes atividades básicas: o sistema de referência (extensão, tipo de revestimento, condição da superfície e geometria), a avaliação dos pavimentos, a determinação das prioridades e, por fim, a elaboração de um programa plurianual de investimentos (DNIT, 2011).

Quanto a coleta de dados, Visconti (2000) afirma que algumas características nesta etapa são importantes como, o treinamento de todo o pessoal envolvido no processo, a realização de uma análise crítica acerca dos dados coletados,

informações de fácil compreensão e sempre atualizadas, assim como os custos dos levantamentos devem ser os menores possíveis.

Importante citar que a avaliação dos pavimentos, dentro do banco de dados do SGP, é um dos índices mais relevantes na tomada de decisão para recuperar um pavimento (DNIT, 2011). A avaliação considera condições funcionais, estruturais e condições operacionais.

DNIT (2011) explica que a condição estrutural está relacionada a capacidade de carga e requer uma análise de projeto e dimensionamento do pavimento. Quanto as condições operacionais, para o autor, o principal fator de estudo é o tráfego incidente na malha rodoviária, com base na carga atuante ou na capacidade de tráfego.

Por fim, a avaliação da condição funcional do pavimento está ligada ao estado da superfície, de como ela se encontra e como interfere no conforto ao rolamento. O DNIT apresenta alguns parâmetros para análise deste item em específico, o Valor da Serventia Atual (VSA) que é uma medida subjetiva baseada em notas dadas por técnicos avaliadores, o Índice de Irregularidade Internacional (IRI), que é um parâmetro determinado por medições de irregularidade longitudinal, efetuadas com equipamentos específicos para este fim (DNIT, 2011), e o Quociente de Irregularidade (QI) que também é utilizado para avaliação da irregularidade longitudinal.

Feitas as avaliações nos três âmbitos mencionados anteriormente (funcional, estrutural e operacional) chega a hora da tomada de decisão por parte do SGP, que pode ser em nível de rede e/ou em nível de projeto. Este último é de curto prazo e se refere a trechos específicos, com dados coletados de maneira mais profundada, com estudo das camadas do pavimento e avaliação do tipo e data da execução da obra (DNIT, 2011).

Já a gerência em nível de rede trata de trechos prioritários, que são alvos para a manutenção e integram uma grande malha rodoviária. DNIT (2011) afirma que neste nível as informações são mais simples e demandam menos tempo para a obtenção dos dados.

No geral, a tomada de decisão em ambos os níveis se complementa, pois o trecho crítico apontado pelo nível em rede é estudado de maneira mais aprofundada a nível de projeto. Verificar a confiabilidade e o bom uso de um SGP se dá através

da análise da coerência dos resultados obtidos em nível de projeto com o planejamento em nível de rede (DNIT, 2011).

Assim, a partir do estudo em níveis é possível obter um estudo mais completo dos pavimentos e garantir um sistema mais eficiente. Silva (2008) entende que a função da gerência em níveis compreende a comparação de alternativas, coordenação de atividades e tomadas de decisões, além de garantir que as decisões tomadas serão implantadas de maneira eficiente e econômica.

Para a atividade de gerência de pavimentos como um todo, a CNT (2017) afirma que é essencial conhecer e acompanhar as condições das rodovias para identificar e planejar as necessidades de intervenção, assim como os recursos que serão demandados por elas.

Para Campos (2004), o resultado final do sistema de gerência de pavimentos deve proporcionar um acompanhamento contínuo dos pavimentos, com definição de quando as intervenções de manutenção serão executadas, como serão implementadas e quanto custará ao órgão gestor.

De acordo com o mesmo autor, após os resultados serem obtidos, erros e acertos serão avaliados e poderão ser utilizados para o aperfeiçoamento do sistema, de maneira que quanto mais dados existirem melhores serão as previsões.

Contudo, Islam (2014) aponta que muitas agências de transporte não coletam dados anuais da condição do pavimento da rede rodoviária devido aos altos custos envolvidos e, por isso, as decisões de manutenção e reabilitação são frequentemente realizadas com dados desatualizados.

Diante do exposto, é possível considerar que o Sistema de Gerência de Pavimentos organiza-se da seguinte maneira:

- a. Identifica e define os trechos de estudo;
- b. Coleta os dados referentes ao pavimento, coletando características físicas e condição atual;
- c. Análise em nível de rede;
- d. Análise em nível de projeto (definição das atividades para manutenção, reforço e/ou restauração);
- e. Análise econômica;
- f. Definição das prioridades.

## 2.2 Irregularidade Longitudinal do Pavimento

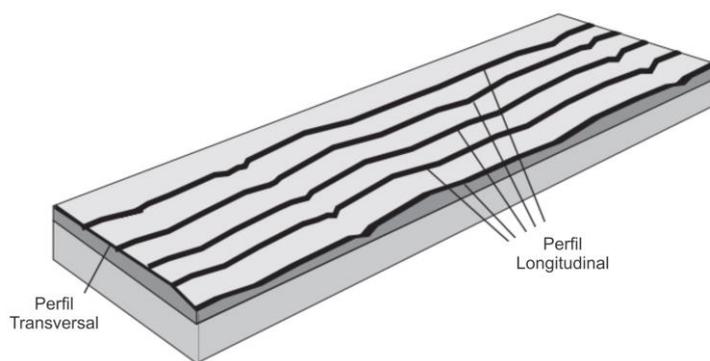
Quando se refere a avaliação funcional dos pavimentos dentro do SGP, a irregularidade longitudinal é um item de grande importância. Bernucci *et al.* (2010) define a irregularidade longitudinal como a soma dos desvios da superfície do pavimento em relação a um plano de referência que afeta a dinâmica do veículo, a qualidade do rolamento e a drenagem superficial da via.

Já para Sayers *et al.* (1986) a irregularidade longitudinal é a variação na elevação da superfície que produz vibrações nos veículos em movimento, e um indicador das condições da estrada útil para tomar decisões objetivas relacionadas a gestão de redes rodoviárias.

E para o DNIT (2006) é o somatório das deformações da estrutura do pavimento, como afundamentos de trilhas de rodas e distorções do perfil longitudinal, que promovem a irregularidade longitudinal.

Ainda, é um valor que resume os desvios do pavimento em um intervalo entre dois pontos (SAYERS; KARAMIHAS, 1998), que pode ser visualizado nos perfis longitudinais retirados ao longo de uma linha lateral, onde fica aparente a superelevação, a curvatura do projeto da estrada, a textura e seus defeitos (SAYERS; KARAMIHAS, 1998), como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Detalhe de um perfil longitudinal



Fonte: Adaptado de Sayers; Karamihas (1998)

A avaliação da irregularidade longitudinal parte da elaboração de um perfil longitudinal do pavimento. A ASTM E1364 (2005) afirma que este perfil é obtido em intervalos constantes ao longo de uma linha em uma superfície percorrida, onde esta linha deve ser a trilha de roda formada pelo pneu do veículo.

Severo *et al.* (2004) destaca que o perfil longitudinal inclui o greide, a irregularidade e a textura do pavimento, dependendo de como e para que ele é medido. Ainda, para o autor, este perfil se relaciona com os elementos que caracterizam a boa funcionalidade do pavimento.

Sob esse enfoque, Barella (2008) afirma que a medida do perfil longitudinal do pavimento é feita sobre uma linha imaginária paralela ao eixo da pista. Para o autor só existe um perfil verdadeiro e que duas medições no mesmo local só serão iguais se forem feitas sobre a mesma linha, a menos que a via esteja perfeitamente plana.

Bernucci *et al.* (2010) comenta que a irregularidade é medida paralelamente ao eixo da estrada e, em geral, coincide com as regiões de trilhas de roda. Geralmente é um fenômeno que decorre de imperfeições durante o processo construtivo, da degradação do pavimento, ou também devido ao tráfego e clima da região. Por isso, não se deve entender a irregularidade apenas como mais um defeito da superfície, mas como um parâmetro que representa o que um conjunto de defeitos gera na qualidade de rolamento dos veículos (DNIT, 2011).

Ou seja, como afirma Campos (2004), a irregularidade longitudinal retrata o somatório de todos os demais defeitos encontrados no pavimento. O autor explica que o aparecimento e a evolução do trincamento superficial, das painelas, trilhas de roda, além da deformação recuperável e o efeito das intempéries, todos estes defeitos resultam em alterações na irregularidade longitudinal dos pavimentos.

Ao analisar os dados de sua pesquisa, Bueno (2019) selecionou parâmetros a fim de quantificar a representatividade destes na evolução da irregularidade longitudinal, contudo, nenhum parâmetro representativo do surgimento de afundamentos em trilha de roda foi considerado. Mesmo assim, uma modelagem IRI foi possível em seu estudo, sem a presença do ATR, permitindo o autor concluir que irregularidades altas não se relacionam diretamente com afundamentos altos, mas sim com descontinuidades de perfil no decorrer da trilha de roda.

Nos trechos estudados por Bueno (2019), não houve afundamentos em trilha de roda significativos. Para o autor, ainda que existisse uma associação significativa entre irregularidade longitudinal e afundamento em trilha de roda, os afundamentos de baixa magnitude não teriam capacidade de explicar o comportamento das medidas de IRI.

Para que se possa compreender a irregularidade longitudinal do pavimento, índices foram elaborados. No Brasil, o DNIT (2006) normatiza o parâmetro QI - Quociente de Irregularidade como uma escala padronizada para medir a irregularidade longitudinal do pavimento.

Para que se possa encontrar o valor de QI existe a normativa DNER-ES 173/86, denominada “Método de Nível e Mira para Calibração de Sistemas Medidores de Irregularidade Tipo Resposta”. A norma técnica define que um valor de Quociente de Irregularidade poder encontrado a partir da Equação 1.

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

Onde,

QI = Quociente de Irregularidade

VA = Aceleração vertical média quadrática, referente a uma distância de base igual a 1,0m e de base igual a 2,5m.

Os valores do Quociente de Irregularidade são em contagens por quilômetro, essa unidade está associada a um equipamento chamado BPR Roughometer que era em polegadas/milha. De acordo com Barella (2008) apenas multiplicou-se polegadas/milha por 0,6214 para que se obtivesse contagens/km.

Embora a normalização do DNER fixe o QI como sendo o índice de irregularidade longitudinal oficial, alguns órgãos, agências e concessionárias utilizam os resultados em IRI obtidos por perfilômetros ou perfilógrafos laser (ANTT, 2017).

O conceito de QI e IRI são bastante similares e correlacionados através da Equação 2:

$$QI = 13 IRI \quad (2)$$

Esta correlação não é constante, contudo, uma relação entre IRI e QI pode ser percebida pela Tabela 1.

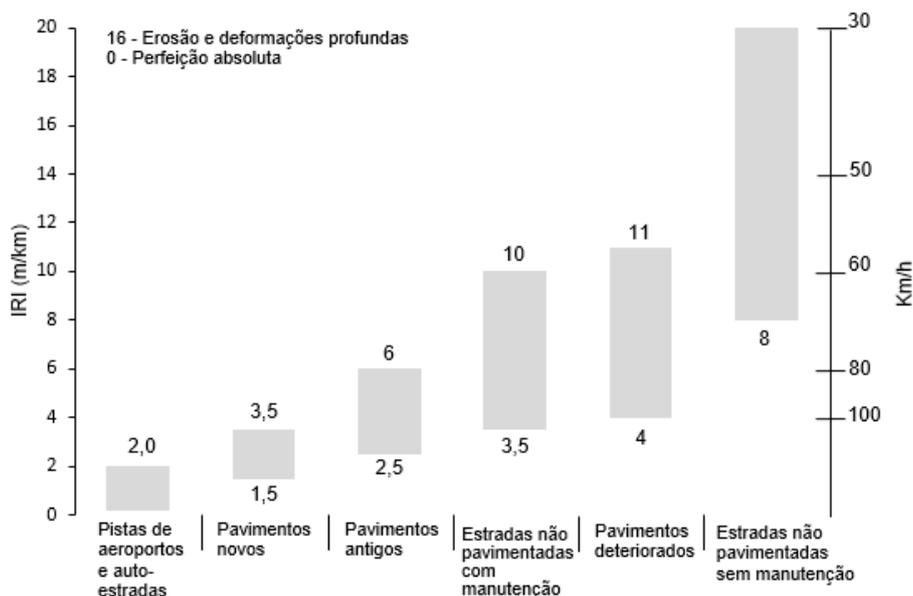
Tabela 1 – Conceito de trafegabilidade IRI e QI

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

Fonte: DNIT (2006)

Bernucci *et al.* (2010) compreende que a escala IRI se trata de um índice estatístico de avaliação internacional expresso em m/km, que tem medidas variadas de acordo com o local e situação do revestimento, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Escala IRI



Fonte: Adaptado de Sayers; Karamihis (1998)

É importante salientar que há índices aceitáveis de irregularidade no pavimento para a trafegabilidade do usuário, que se divide em bom, regular, ruim ou péssimo, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Conceito de trafegabilidade IRI

<b>Conceito</b>	<b>IRI (m/km)</b>
Excelente	1 – 1,9
Bom	1,9 – 2,7
Regular	2,7 – 3,5
Ruim	3,5 – 4,6
Péssimo	> 4,6

Fonte: DNIT (2006)

Já para a ASTM E1926 (2005) a escala IRI varia de zero a dez, aumentando de acordo com a irregularidade longitudinal do pavimento betuminoso. Na Tabela 3 está descrito o que cada valor dentro da escala representa para avaliação da condição do pavimento com base no *World Bank Technical Paper Number 46*.

Tabela 3 – Escala IRI com base na ASTM E1926e IRI

<b>Escala IRI</b>	<b>Descrição</b>
<b>0 – 2</b>	Tráfego confortável, não há buracos ou ondulações;
<b>2 - 4</b>	Superfície defeituosa, com depressões ocasionais e ondulações moderadas;
<b>4 – 6</b>	Oscilações são fortemente perceptíveis;
<b>6 – 8</b>	Há movimentos bruscos frequentes associado a graves defeitos, depressões profundas e desiguais;
<b>8 – 10</b>	Profundas depressões e severa desintegração, a velocidade para o rolamento deverá ser bastante baixa.

Fonte: Adaptado de ASTM E1926 (2005)

Sayers *et al.* (1986) salienta que a influência no valor da irregularidade está no detalhe, pois em algum momento ao longo do rolamento do veículo haverá uma elevação abrupta que definirá o perfil da irregularidade. Ou seja, comprimentos de

onda mais curtos são mais significativos, pois não acompanham a trajetória contínua da estrada, por exemplo, um buraco no meio da pista.

Sendo assim, vários são os equipamentos disponíveis para mensurar a irregularidade, para Sayers *et al.* (1986) eles se enquadram em 4 grupos: Classe 1, perfis de precisão com o mais alto padrão de acurácia; classe 2, métodos perfilométricos; classe 3, irregularidade estimada por equações de correlação; e classe 4, subjetivações e medidas não calibradas que envolvem um passeio na via /ou uma observação visual.

Almeida (2018) acrescenta que os métodos de classe 1 e 2 são aqueles em que a reprodutibilidade da irregularidade não pode ser melhorada, eles fazem uso de programas computacionais baseados em algoritmos matemáticos. Já os de classe 3 são geradores de perfis simples ou equipamentos do tipo resposta que se apropriam de equações de correlação para estimar a irregularidade longitudinal. Por fim, para o autor, os métodos da classe 4 além da inspeção visual, permite a adoção de um sistema de classificação baseado em código, no qual são atribuídas notas à condição da superfície do pavimento (método VSA).

A divisão dos equipamentos também pode ser feita de acordo com o tipo de sistema de medição, sendo que o DNIT (2006) indica quatro grupos. Sistema de medida direta do perfil como o método de nível e mira, sistema de medida indireta do perfil em que os dados devem ser processados, os sistemas baseados na reação do veículo, do tipo resposta, e os sistemas de medida de sonda sem contato que são os perfilômetros a laser.

Campos (2004) entende que os aparelhos sem contato possuem maior acurácia e de produtividade extremamente alta, apesar dos custos elevados. Ainda, os equipamentos de tipo resposta requerem calibração constante e são de menor acurácia, mas com custos mais baixos. Por fim, o meio de menor previsão são os subjetivos.

Sayers *et al.* (1986) explica que muitos são os métodos existentes para mensurar a irregularidade longitudinal do pavimento, por isso a importância de existir um índice/ grau de medida. Só assim é possível comparar estudos e normas.

Mesmo com a existência de um índice os métodos são muitos e, por isso, ainda não há consenso entre os órgãos gestores quanto ao melhor equipamento a

ser utilizado e a velocidade que deve ser adotada na avaliação da irregularidade longitudinal (ALMEIDA, 2018).

A seguir serão mais explorados os métodos para medição da irregularidade longitudinal, com destaque aos que serão utilizados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

### 2.2.1 Perfilômetro Inercial a Laser

Dentre os equipamentos medidores é importante destacar os de alta precisão, como o caso do perfilômetro inercial a laser. Como representado na Figura 4, o equipamento é composto por uma barra a laser presa ao para-choque do carro, que possui sensores de leitura do pavimento.

Figura 4 – Perfilômetro inercial a laser



Fonte: ASTEC (2020)

O medidor é considerado de leitura indireta, ou seja, ele não entra em contato com a superfície do pavimento. Sayers e Karamihas (1998) citam que é um instrumento de classe 1, e que a depender da precisão do modelo escolhido pode ser considerado, para efeitos práticos, a medida IRI deste sistema como a verdadeira irregularidade longitudinal.

Quanto mais preciso o equipamento, mais a medição se aproxima do perfil verdadeiro. Por isso, um bom levantamento do perfil longitudinal apresenta as características necessárias para a identificação dos defeitos (OLIVEIRA E ALBUQUERQUE, 2017).

Para Oliveira e Albuquerque (2017) o perfilômetro inercial a laser possui uma elevada taxa de aquisição de dados o que permite um perfil longitudinal com

espaçamento milimétrico. Outra vantagem do equipamento, para os autores, é permitir que a coleta dos dados seja feita com velocidade normal de trafegabilidade da via estudada. A velocidade do veículo durante as medições não tem um limite máximo, entretanto, a depender do equipamento, é recomendado que a velocidade ultrapasse a 30 km/h. (FRANDOLOZO, 2010).

Barella (2008) descreve que o componente inercial do perfilômetro é um acelerômetro, que se destina à compensação dos movimentos verticais do veículo a partir da medição da aceleração vertical.

Oliveira e Albuquerque (2017) acrescentam que o equipamento é modular, geralmente com três módulos a laser, dois acelerômetros gravitacionais, um hodômetro e um GPS. Os módulos a laser podem ser acrescentados ou suprimidos, de acordo com a necessidade de cada levantamento. Todos os componentes são gerenciados por um sistema que coordena a aquisição dos dados e os envia para um computador em tempo real (FRANDOLOZO, 2010).

Severo *et al.* (2004) explica o funcionamento do equipamento: o veículo com o perfilômetro acoplado trafega pelo trecho de escolha e concomitantemente o computador registra o deslocamento longitudinal, a altura do veículo até o pavimento e a aceleração vertical do veículo. Após esta etapa os dados gravados são processados para que a aceleração vertical se transforme em deslocamento vertical do veículo, com o cálculo de duas integrações sucessivas. Ao fim se obtém o perfil da faixa de rolamento medido (próximo ao perfil verdadeiro).

No entanto, é preciso ressaltar quais os resultados que se pode obter com o levantamento. Severo *et al.* (2004) acredita que findada a aquisição de dados o pesquisador estará munido de um ou vários perfis longitudinais que têm relação com o perfil verdadeiro do pavimento e com estes obterá os índices de irregularidade.

Desta forma, Sayers e Karamihas (1998) entendem que um equipamento inercial é útil para quatro grandes aplicações: para o monitoramento da condição de uma rede rodoviária, para avaliação da qualidade de pavimentos recentes ou reparados, para diagnóstico de locais específicos e possíveis soluções, e por último, como estudo investigativo das condições de locais específicos.

### 2.2.2 *Smartphone*: Medidor do Tipo Resposta

Em 1920 os engenheiros rodoviários já instalavam dispositivos nos carros para registrar o curso da suspensão como uma medida de irregularidade do pavimento, estes equipamentos tinham vários nomes como: sistema de tipo resposta, sistema de medição de estrada ou sistema de medição da irregularidade de estradas do tipo resposta. (SAYERS; KARAMIHAS, 1998).

Severo (2004) assegura que os medidores de irregularidade do tipo resposta são relativamente simples, medem cumulativamente as variações na distância entre o eixo do veículo e sua carroceria durante o tráfego, ou seja, medem os movimentos da suspensão do veículo.

No Brasil é muito comum o uso destes equipamentos para medição da irregularidade longitudinal, pois apresentam um custo baixo, boa produtividade, acurácia aceitável, com necessidade apenas de uma calibração (CAMPOS, 2004).

Contudo, Bisconsini (2016) afirma que ainda não há uma forma de medir a irregularidade longitudinal dos pavimentos com precisão, exatidão, alto rendimento e baixo custo simultaneamente.

Em busca destes requisitos é que alguns autores estão estudando o uso de *smartphones* para avaliação da irregularidade longitudinal. De acordo com Schlotjes *et al.* (2014) a utilização destes aparelhos para estimar a irregularidade longitudinal tem apresentado bons resultados, e podem ser correlacionados com os índices de irregularidade obtidos por outros equipamentos de medição. Com isso, para o autor, os *smartphones* possuem potencial para gerar dados relevantes, com nível de qualidade que pode ser utilizado em um SGP.

Na visão de Bisconsini (2016) o uso de *smartphones* para avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos pode ser vista como um sistema de medição do tipo resposta, mesmo que não funcione como um medidor convencional desta categoria. O autor explica que o aparelho é capaz de medir acelerações verticais se fixado internamente em um veículo, gerando sinais que tem correlação com o IRI e com a avaliação funcional do pavimento.

Para a equiparação entre instrumentos Sayers e Karamihas (1998) indicam a necessidade de uma calibração, que nada mais é do que um processo de corrigir a escala de um dispositivo de medição.

Para a calibração dos sensores de aceleração, por exemplo, é possível utilizar um transferidor ou inclinômetro. Quando o aparelho apontar para baixo o sensor de aceleração vertical deve marcar a força gravitacional, quando perpendicular para cima, deve registrar um valor negativo da força gravitacional (SEVERO *et al.*, 2004).

Ainda sobre a calibração, Bisconsini (2016) aponta que como em qualquer equipamento do tipo resposta os dados são muito sensíveis a velocidade de tráfego do veículo e por isso precisam da calibração por correlação, para determinar a relação entre os valores da irregularidade longitudinal de referência e os deslocamentos verticais e horizontais medidos.

Contudo, assim como os perfilômetros e outros equipamentos tipo resposta, os *smartphones* não produzem um perfil verdadeiro da superfície, mas um perfil percebido com base no efeito de amortecimento do sistema de suspensão do veículo, como dito antes. (ISLAM, 2014).

Quanto a aceleração vertical, Islam (2014) aponta que estas são geradas por irregularidades da superfície do pavimento quando o veículo está em movimento. Para o autor, a magnitude destas elevações depende da gravidade e da frequência do desgaste do pavimento, da suspensão e da velocidade do veículo.

No que se refere a velocidade, Magalhães (2019) comenta que com o aumento da velocidade operacional do veículo, também há aumento das acelerações verticais e dos valores de RMVSA (Raiz da Média Quadrática da Aceleração Vertical). Para o autor isso explica a sensibilidade dos motoristas quanto as vibrações do veículo, quando trafegam em altas velocidades.

Quando se trata dos sensores dos *smartphone*, Islam (2014) revela que é preciso um telefone celular com um acelerômetro de três eixos para coletar os dados de aceleração vertical do veículo. Em relação ao acelerômetro, Bisconsini (2016) destaca que estes são sensores capacitivos relativamente simples, que fornecem um jeito preciso de captar o movimento dos objetos.

Ainda, Bisconsini (2016) complementa ao afirmar que boa parte dos *smartphones* possuem capacidade de processamento que pode ser considerada avançada, um GPS e sensores de movimento como o acelerômetro e o magnetômetro.

Magalhães (2019) observa que os dispositivos móveis permitem o uso de aplicativos que adquirem os dados dos sensores, o que facilita o acesso aos dados em tempo real, além de permitir armazenar, manipular e transferir para outros aparelhos através de uma conexão com a internet.

Com isso, muitos aplicativos surgiram a fim de explorar o universo dos sensores. Bisconsini (2016), por exemplo, utilizou o aplicativo AndroSensor em sua pesquisa com a justificativa de que é um aplicativo gratuito, com mais de um milhão de instalações, que é capaz de coletar acelerações e coordenadas de latitude e longitude simultaneamente.

Já Magalhães (2019), Chaves *et al.* (2020) e Almeida (2018) utilizaram o SmartIRI. De acordo com Chaves *et al.* (2020), por ser nacional, o software foi vantajoso na sua simplicidade e objetividade durante a operação, sem apresentar falhas. Já Almeida (2018), idealizador do aplicativo em sua dissertação de mestrado, concluiu que a tecnologia do dispositivo atingiu uma alta performance e permitiu a obtenção de resultados satisfatórios ao estimar IRI a partir dos sinais de aceleração vertical.

Duarte (2019) explica que o SmartIRI obtém os valores de IRI por meio da correlação com o RMSVA, ele processa os valores de aceleração vertical e calcula o RMSVA a cada 100 metros. Da mesma forma, Bisconsini (2016) utiliza o cálculo de RMSVA a partir da Equação 3.

$$RMSVA = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N a_{zi}^2} \quad (3)$$

Onde:

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

a = Aceleração vertical (m/s<sup>2</sup>)

n = número de dados.

Bisconsini (2016) resume duas abordagens para relacionar a irregularidade longitudinal dos pavimentos com os dados captados pelo *smartphone*. A primeira sugere colocar o aparelho celular em um suporte fixo no interior do veículo, de maneira que fique o mais perpendicular possível ao eixo longitudinal do automóvel, e então coletar os sinais de aceleração e localização com uso de um aplicativo de

escolha. Após, separar os dados de acordo com os trechos de interesse e calcular os valores de RMSVA.

A segunda abordagem é para o cálculo direto de IRI, neste caso além de seguir os passos anteriores o pesquisador deve realizar uma filtragem e cálculo de uma dupla integral dos dados de aceleração em função do tempo, como mostra a Figura 5, para então calcular o índice de irregularidade por meio de algoritmos conhecidos.

Figura 5 – Diagrama do processamento de dados de aceleração



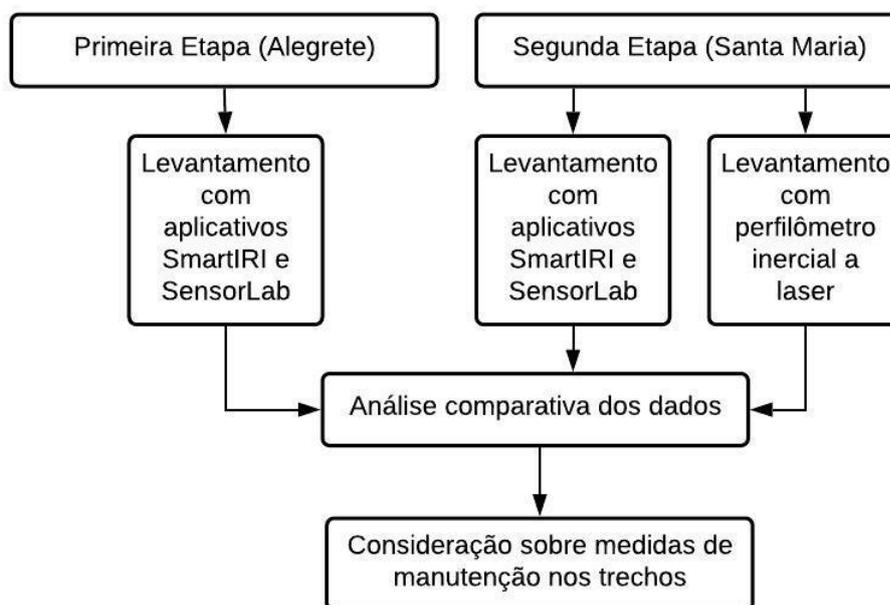
Fonte: Bisconsini (2016)

O filtro se faz necessário neste caso para evitar erros indesejáveis e oscilações aleatórias geradas pelos acelerômetros (BISCONSINI, 2016).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão apresentados os materiais e métodos que foram necessários para atingir os objetivos do trabalho. O processo está apresentado no fluxograma da Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaboração própria

#### 3.1 Materiais

Os telefones celulares utilizados para o levantamento dos dados foram um *smartphone* Samsung J8 e um Samsung Galaxy Mini. Os trechos estudados com os equipamentos estão localizados na cidade de Santa Maria e Alegrete, ambas no Rio Grande do Sul.

Os veículos utilizados na cidade de Santa Maria foram uma S10 ano e modelo 2017, que possui o perfilômetro acoplado, um Civic ano e modelo 2014 e em Alegrete foi utilizado apenas o Civic ano e modelo 2014. Para a fixação do Samsung Galaxy Mini nos veículos foi utilizada uma base antiderrapante (ou tapete mágico) que tem o intuito de prender objetos no painel do carro e está disponível em conveniências de postos de combustível, como demonstra a Figura 7.

O objeto de material adesivo de gel sílica foi escolhido por não permitir a “flutuação” do aparelho, como acontece com outros dispositivos mais conhecidos, de acordo com o sugerido por Bisconsini (2016).

Já para a fixação do aparelho Samsung J8 no painel dos veículos, foi utilizado um suporte celular com ventosas que permite a rotação, como mostra também a Figura 7. Este objeto foi escolhido por ser o indicado pelos desenvolvedores do aplicativo SmartIRI, pois permite que o celular fique firme e posicionado verticalmente no painel do veículo.

Figura 7 – Aparelhos devidamente fixados no painel do veículo

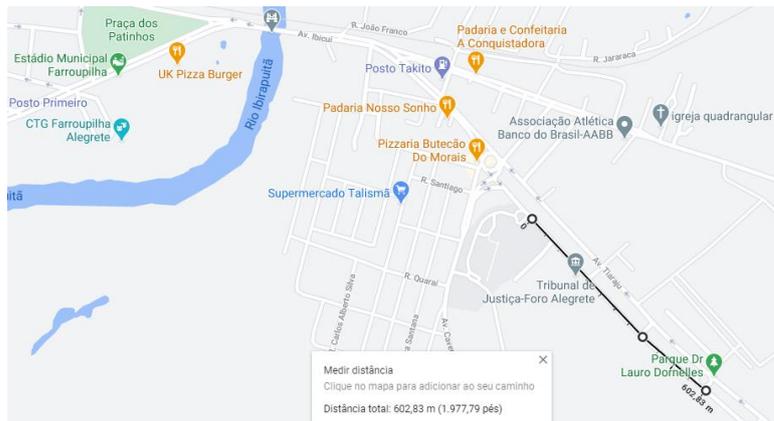


Fonte: Elaboração própria

Em um primeiro momento, em Alegrete, a escolha das vias se deu pelo nível de degradação que se encontram, através de uma observação visual, e também pelo tipo de revestimento que possuem.

Assim, foi avaliada a Avenida Tiarajú por ter um revestimento asfáltico mais novo, finalizado em 2019, como mostram as Figuras 8 e 9. A via é considerada uma avenida coletora que permite velocidades de até 40km/h.

Figura 8 – Localização da Avenida Tiarajú, Alegrete/RS



Fonte: Google Maps (2020)

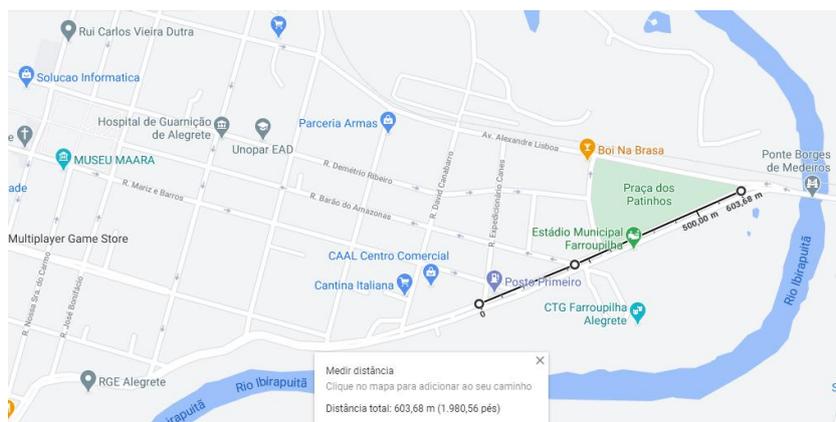
Figura 9 – Condições atuais da Avenida Tiaraju



Fonte: Elaboração própria (2020)

Outra avenida avaliada foi a Avenida Eurípedes Brasil Milano (Figuras 10 e 11), também de revestimento asfáltico, mas com visível degradação. Trata-se de uma via coletora, porém a velocidade permitida no trecho da via estudado é de 30km/h.

Figura 10 – Localização da Avenida Eurípedes Brasil Milano, Alegrete/RS



Fonte: Google Maps (2020)

Figura 11 – Condições atuais da Avenida Eurípedes Brasil Milano

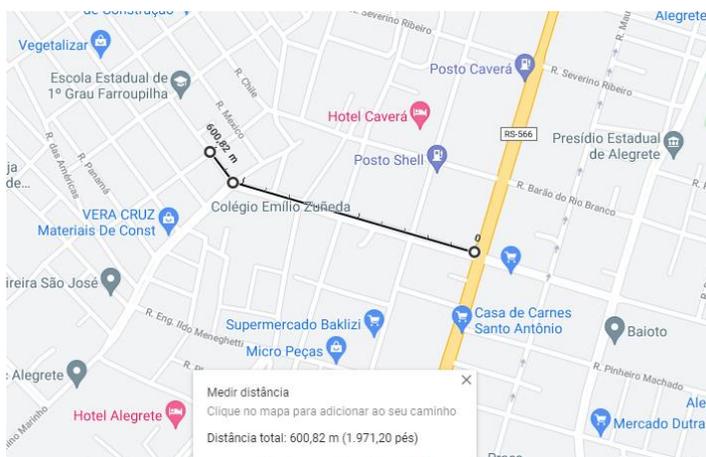


Fonte: Elaboração própria (2020)

E por fim, em Alegrete, o levantamento foi feito no pavimento que tem início da Rua Barros Cassal até a Rua Colômbia, apresentadas das Figuras 12 e 13. Por ser uma rua local, de paralelepípedos, com um menor índice de tráfego, a velocidade permitida é de até 30km/h.

A intenção inicial era avaliar a Rua Conde Porto Alegre, contudo, ao chegar no local para análise com o veículo, percebeu-se que a qualidade e fluxo das vias perpendiculares a ela (o que gera entrada e saída de veículo continuamente nos cruzamentos) não permitiria que o levantamento fosse de velocidade contínua e sem freadas bruscas, desta forma optou-se por realizar o levantamento de dados na Rua Barros Cassal com prolongamento na Rua Colômbia.

Figura 12 – Localização da Rua Barros Cassal



Fonte: Google Maps (2021)

Figura 13 – Condições atuais da Rua Barros Cassal



Fonte: Elaboração própria (2021)

Em um segundo momento os levantamentos ocorreram em Santa Maria, onde as ruas escolhidas também tiveram como base a percepção visual da condição do pavimento. Assim, os levantamentos ocorreram em três trechos, dois deles dentro do campus sede da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e um na BR 287.

A primeira via (adotada aqui como Trecho 1) está localizada dentro da universidade, sendo um pavimento com revestimento asfáltico considerado bom para a trafegabilidade do veículo, como é possível observar nas Figuras 14 e 15.

Figura 14 – Localização do Trecho 1



Fonte: Google Maps (2021)

Figura 15 – Condições atuais da Trecho 1 de Santa Maria



Fonte: Elaboração própria (2021)

O segundo pavimento estudado em Santa Maria foi o Trecho 2, uma via de paralelepípedo (Figura 16 e 17) localizada dentro da UFSM.

Figura 16 – Localização do Trecho 2



Fonte: Google Maps (2021)

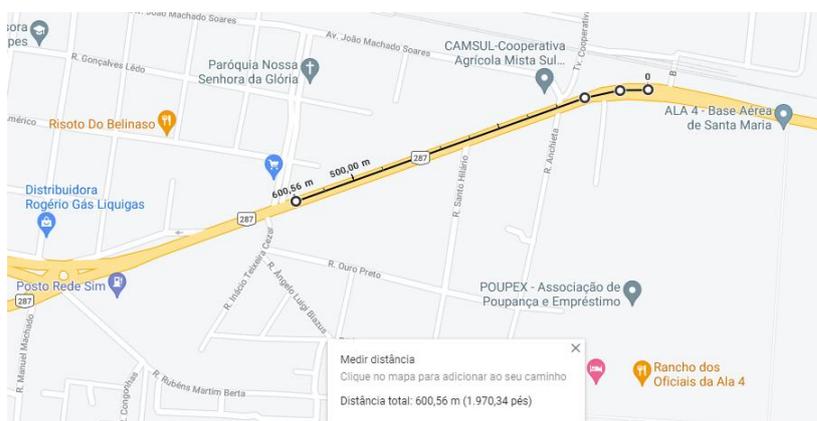
Figura 17 – Condições do Trecho 2



Fonte: Elaboração própria (2021)

Por fim, para o terceiro trecho foi escolhido um pavimento com revestimento asfáltico que visualmente não estivesse em boas condições. A via escolhida foi a BR 287, como mostram as Figuras 18 e 19, que adota uma velocidade mínima de 50km/h em área urbana.

Figura 18 – Localização do trecho da BR 287



Fonte: Google Maps (2021)

Figura 19 – Condições do trecho BR 287



Fonte: Elaboração própria (2021)

### 3.1.1 Perfilômetro Inercial a Laser

Nos levantamentos realizados em Santa Maria, o equipamento que foi a base para a calibração dos aplicativos dos *smartphones* é o perfilômetro inercial a laser, pois como já referenciado, é um instrumento de alta precisão e confiabilidade nos resultados.

Para este estudo, o perfilômetro inercial a laser utilizado foi um equipamento cedido pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), isso porque a UNIPAMPA não possui este equipamento e já existe uma parceria entre as universidades (UNIPAMPA e UFSM).

O perfilômetro a laser utilizado foi o Ciberlaser, apresentado na Figura 20, que possui uma taxa de aquisição de 4000 medidas por segundo. É composto por 5 módulos laser (dois com acelerômetro posicionado nas trilhas de roda) e um GPS.

Figura 20 – Ciberlaser acoplado no veículo utilizado para estudo



Fonte: Elaboração própria (2021)

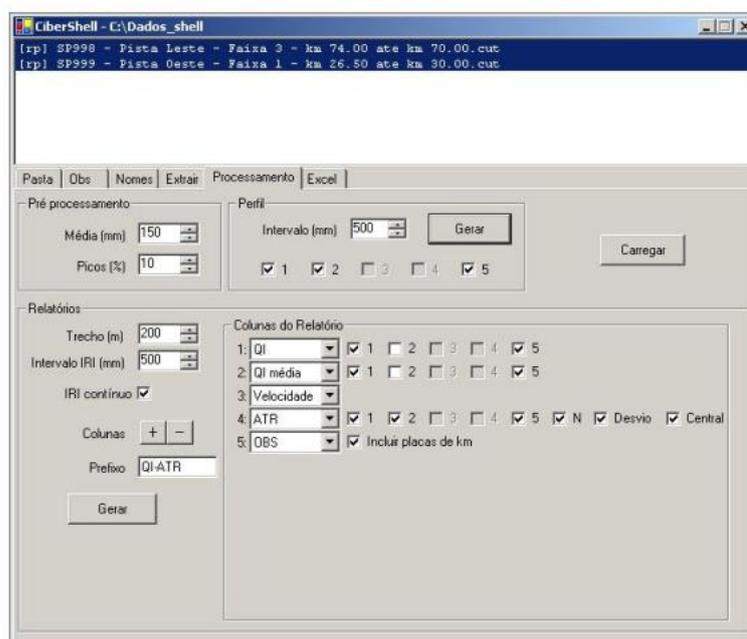
O equipamento é modular, ou seja, permite o acréscimo ou retirada de módulos laser. De acordo com a Ciber métrica (2017), seus principais componentes são: módulo de medição com acelerômetros internos, hodômetro de precisão, Hub para envio das informações para um computador, suporte para fixação no veículo, barra para fixação dos módulos, software de coleta de informação (denominado CiberLogger) e software para processamento dos dados (nomeado de CiberShell).

De acordo com a fabricante a instalação do perfilômetro pode ser na dianteira ou traseira de qualquer veículo. Para a fixação na dianteira é ideal que o veículo escolhido tenha sido adquirido apenas para esta finalidade, pois adaptações serão necessárias. Contudo, se a utilização do equipamento for na traseira o veículo não precisará de adaptações e poderá ser utilizado para outros propósitos, pois geralmente os veículos já permitem fixação de engastes traseiros.

Para o cálculo da irregularidade longitudinal os módulos utilizados foram os localizados a esquerda e a direita do veículo. Assim, ao final do levantamento, se obtém um valor de IRI esquerdo, um valor de IRI direito e um valor de IRI médio que é a média entre os valores de IRI direito e IRI esquerdo, este que é de maior interesse para este trabalho.

Para a geração dos valores de IRI, o programa CiberShell utiliza alguns parâmetros que podem ser visualizados na Figura 21.

Figura 21 – Parâmetros para cálculo do IRI



Fonte: Ciber métrica (2017)

Dentro do programa, na aba Processamento apresentada na Figura 21, é possível configurar várias variáveis de processamento. De acordo com o manual do equipamento (Ciber métrica 2017), a caixa “Média” significa o comprimento da média móvel que será usada nos dados obtidos pelo perfilômetro a fim de filtrar o efeito da textura do pavimento. E a caixa “Picos” que é um filtro com a finalidade de eliminar o efeito da textura na irregularidade.

Na região inferior da Figura 21, onde estão os itens referentes a Relatórios, a caixa “Trecho” se refere ao espaçamento que o programa utilizará para totalizar os índices calculados. No caso deste trabalho o valor escolhido foi de 20 em 20 metros.

Onde está indicado “Intervalo IRI (mm)”, com base na norma ASTM 950, utilizou-se um intervalo de 250 mm, que significa o intervalo entre pontos do perfil que será usado para cálculo do IRI.

Por fim, o último parâmetro relevante para o cálculo da irregularidade longitudinal é a opção de calcular o IRI de maneira contínua, indicado para condições normais de uso do equipamento, pois assim é gerado um perfil e cálculo contínuo de IRI para o pavimento estudado.

### 3.1.2 Aplicativo SmartIRI

A escolha dos aplicativos utilizados neste estudo teve como base a facilidade de acesso e dados gerados pelos softwares. No caso do aplicativo SmartIRI, um aplicativo pago, que teve seu acesso disponibilizado pelos próprios desenvolvedores por ser para fins acadêmicos.

A vantagem da escolha deste software se deu pela facilidade na obtenção dos resultados, sem necessidade de tratamento de dados como o SensorLab. Esta diferença acontece porque o SmartIRI, desenvolvido pela Universidade do Ceará, foi projetado para avaliação do pavimento. Diferente do SensorLab, que apenas explora os sensores dos telefones celulares, sem área de uso específica.

O aplicativo SmartIRI após ser instalado no *smartphone* funciona sem conexão com a internet durante o levantamento, ele disponibiliza fotos georreferenciadas dos trechos estudados e permite a visualização e exportação dos resultados de maneira fácil. A interface do aplicativo é apresentada na Figura 22.

Figura 22 – Interface do aplicativo SmartIRI



Fonte: Elaboração Própria (2021)

De acordo com o desenvolvedor Almeida (2018) o *smartphone* contendo o aplicativo é posto em um veículo por meio de um suporte e utiliza sensores dos dispositivos, como o acelerômetro e o sensor do Sistema de Posicionamento Global (GPS), para obter a aceleração vertical, velocidade e localização. Os dados são processados de tal maneira que informam em tempo real o valor do IRI georreferenciado.

Para cálculo da irregularidade longitudinal em termos de Índice Internacional de Irregularidade, o desenvolvedor do aplicativo afirma que o modelo foi gerado com o auxílio do software Minitab, a partir de um modelo matemático que teve como base elevados valores de R<sup>2</sup> obtidos nas relações entre RMS, IRI e RMSVA.

A classificação de IRI adotada pelo SmartIRI tem como base no HDM-4<sup>2</sup>, contudo Almeida (2018) adicionou uma classe denominada excelente, alterando as classes subsequentes. O autor justifica a mudança pelo fato de o SmartIRI funcionar como um medidor do tipo resposta e também porque ao observar avaliações de IRI em pavimentos antigos notou um valor de classificação acima de 6 m/km.

Tabela 4 – Classificação proposta pelo SmartIRI

<b>Condição de Trafegabilidade</b>	<b>HDM-4 (m/km)</b>	<b>Condição de Trafegabilidade</b>	<b>SmartIRI (m/km)</b>
<b>Boa</b>	IRI ≤ 2	<b>Excelente</b>	0 < IRI < 2
<b>Regular</b>	2 < IRI ≤ 4	<b>Boa</b>	2 ≤ IRI < 4
<b>Ruim</b>	4 ≤ IRI ≤ 6	<b>Regular</b>	4 ≤ IRI < 6
<b>Péssimo</b>	6 < IRI	<b>Ruim</b>	6 ≤ IRI

Fonte: Almeida (2018)

Ressalta-se aqui que a Tabela 4 difere da classificação apresentada anteriormente na Tabela 2. Para o DNIT uma condição de trafegabilidade péssima é considerada maior que 4,6 m/km, já para o SmartIRI este valor deverá ser maior ou igual a 6 m/km.

### 3.1.3 Aplicativo SensorLab

A escolha do aplicativo SensorLab se deu por estar disponível gratuitamente na loja *PlayStore* e por disponibilizar, após o levantamento, dados de localização dos pontos, o que facilita o reconhecimento dos trechos a serem analisados. Além disso, é de classificação livre<sup>3</sup>, e foi desenvolvido com o intuito de monitorar e gravar todos os sensores a partir de uma única tela (SensorLab, 2020).

<sup>2</sup> HDM-4 é uma ferramenta de gestão desenvolvida pelo Banco Mundial que busca definir prioridades e soluções para procedimentos de manutenção rodoviária (BUENO, 2019).

<sup>3</sup> Não possui qualquer restrição quanto a idade do usuário.

Os sensores são GPS, acelerômetro, giroscópio, bússola, nível de som, medidor de luz, magnetômetro, umidade, pressão, temperatura, contagem de passos e medidor de proximidade. Contudo, essas leituras dependem do *smartphone* no qual o aplicativo está instalado, pois não são todos os aparelhos que possuem todos estes sensores.

Para que o objetivo deste trabalho fosse alcançado, o sensor de importância foi o acelerômetro, pois este mede a aceleração e/ou detecta vibrações com base em eixos ou coordenadas indicadas na própria tela do aplicativo, como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Tela do aplicativo SensorLab



Fonte: Elaboração própria

Cada coordenada é indicada por uma cor e se refere a um sentido de leitura, conforme a posição do dispositivo no momento da medição. Por exemplo, se o *smartphone* for colocado na posição horizontal, esta será o eixo y (cor verde), a vertical será o eixo x (cor vermelha) e a movimentação para cima/baixo é o eixo z (cor azul), como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Indicação dos eixos no aplicativo SensorLab



Fonte: Elaboração própria

Os eixos também indicam se o acelerômetro está funcionando corretamente, fator importante para garantir a veracidade dos dados obtidos. Para isso os eixos x e y devem indicar um valor de aproximadamente zero e o eixo z um valor próximo a  $9,8\text{m/s}^2$  quando em repouso em uma superfície plana, como na Figura 24.

### 3.2 Levantamento de dados

O levantamento de dados foi realizado em dois momentos: primeiro com uso do perfilômetro inercial a laser, pois os dados obtidos com este equipamento são utilizados como valor referência; e, após, os índices de irregularidade longitudinal são medidos com o uso do *smartphone* (aplicativo SensorLab e SmartIRI), para posterior comparação dos resultados.

#### 3.2.1 Primeira etapa

A primeira etapa ocorreu na cidade de Alegrete, nos trechos selecionados. Os levantamentos foram feitos com o carro Civic em que estavam os dois *smartphones*, conectados no painel do veículo com o auxílio da base antiderrapante e do suporte com as ventosas. Cada celular continha um aplicativo em funcionamento, o Samsung J8 estava com o SmartIRI e o Samsung Mini estava com o SensorLab.

Os dados foram gravados a partir de um ponto determinado, previamente definido, em um momento em que a velocidade desejada fosse alcançada. Isso para que fosse possível manter uma constância ao longo do trecho, diminuindo a influência da velocidade nas informações obtidas.

Em um único dia foram feitos 10 percursos com o veículo em cada uma das vias, tendo os trechos estudados o comprimento médio de 600 metros cada.

### **3.2.2 Segunda etapa**

A segunda etapa do trabalho ocorreu em Santa Maria, onde foi utilizado um perfilômetro inercial a laser cedido pela UFSM. Em um primeiro momento utilizou-se no veículo (uma caminhonete S10) em que estava o perfilômetro, os dois *smartphones* com celulares fixos no painel do veículo como na primeira etapa, para que os dados de leitura não fossem comprometidos para análise comparativa posterior, entre primeira e segunda etapa.

Como na primeira etapa, um ponto de início de coleta de dados foi definido, assim como tentou-se manter uma velocidade constante durante o percurso pelos trechos. Todo o levantamento ocorreu em um único dia, durante o período da manhã e da tarde, com o clima de boa condição climática.

Após a passagem com o veículo que continha o perfilômetro acoplado, novamente os trechos foram avaliados, agora com o carro Civic. A velocidade para o levantamento se manteve constante como no percurso feito com a S10, assim como o ponto de início e fim do levantamento.

### **3.3 Processamento de Dados**

O processamento dos dados obtidos foi de acordo com o equipamento e procedimento realizado. No caso do perfilômetro inercial a laser os valores de IRI já estavam disponíveis logo após a finalização do levantamento, necessitando apenas ajustar as configurações para geração da planilha pelo programa CiberShell já citado.

Foi gerada uma planilha para cada uma das pistas estudadas, com os 10 percursos feitos com o veículo. O ponto de partida e finalização do levantamento foi indicada para o perfilômetro de maneira manual, a partir de uma observação visual. Isso significa que o levantamento foi contínuo, para intervalos entre gravações apenas durante o deslocamento de um trecho para o outro.

Os levantamentos feitos com o aplicativo SmartIRI também permitiram que os dados fossem obtidos com rapidez, necessitando apenas enviar os dados para o site

da plataforma. Feito isso, ficaram disponíveis, para cada percurso feito pelo veículo, em cada trecho, as respectivas tabelas geradas e prontas para *download*.

O aplicativo SmartIRI gerou uma planilha com dados que apresentam um valor de IRI a cada 20 ou 35 metros em média, ao todo foram geradas 30 planilhas para Alegrete e 60 planilhas para Santa Maria. Estes valores foram interpolados e organizados de maneira que cada planilha representasse uma média dos valores de IRI a cada 20 metros exatos, para possível comparação entre os 10 percursos e também com os dados obtidos pelos outros equipamentos.

Para o aplicativo SensorLab, como seu propósito é genérico e não para avaliação IRI especificamente, o procedimento foi mais trabalhoso. Ao final de cada percurso (de acordo com o ponto demarcado previamente) os dados foram enviados para um aplicativo de uso pessoal do usuário para posterior organização.

Os valores gerados pelo aplicativo são disponibilizados em tabelas no programa excel, sendo ao total 17 planilhas geradas pelo software. Destas foram utilizadas apenas uma, a Tabela 5, referente ao acelerômetro.

Tabela 5 – Tabela acelerômetro gerada em levantamento teste pelo aplicativo SensorLab

<b>Tempo (ms)</b>	<b>x (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>y (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>z (m/s<sup>2</sup>)</b>
<b>47</b>	4,42927	1,35991	8,72926
<b>97</b>	4,42927	1,21147	8,58561
<b>148</b>	4,39575	1,35033	8,47069

Fonte: Elaboração própria

Para a Tabela 5, o tempo em milissegundos tem como referência o início do levantamento, ou seja, o momento em que o botão de início da gravação foi pressionado no aplicativo. Os valores do acelerômetro estão de acordo com as coordenadas x, y e z, como explicado no item 3.1.3.

O valor da coordenada z foi o mais relevante na hora do processamento de dados, pois é este que mostra o deslocamento vertical do veículo devido a irregularidade do pavimento.

Para isso foi necessário separar os dados desta coluna (coordenada z) a cada 20 metros (com base na relação tempo e velocidade) e aplicar a Equação 3,

onde “n” é o número de dados obtidos para uma distância de 20 metros, e o “a” é a soma das acelerações obtidas.

Ainda, como o eixo z está sob o efeito da gravidade, para que fosse possível calcular os valores de RMSVA, antes foi necessário retirar o valor de  $9,81\text{m/s}^2$  de cada valor. Este procedimento também está indicado por Almeida (2018) em seu trabalho com o uso de *smartphones*.

Para os três aparelhos utilizados nos levantamentos (perfilômetro, *smartphone* contendo o aplicativo SmartIRI e outro com o aplicativo SensorLab) e em cada uma das vias estudadas, tanto em Santa Maria como em Alegrete, um gráfico foi gerado com o acumulo dos 10 percursos a fim de se determinar o exato ponto em que os levantamentos iniciaram, e assim ser possível gerar um média de valor de IRI e RMSVA a cada 20 metros e também uma média geral.

Estes gráficos, com os valores tratados e ajustados, podem ser visualizados no Apêndice A. Com estes gráficos foi possível reunir informações suficientes e necessárias para a comparação entre os equipamentos e pavimentos estudados, assim como gerar um gráfico de dispersão que relaciona o RMSVA com a escala IRI.

Foram feitas correlações entre, a escala IRI que foi obtida pelo perfilômetro (quando comparado dados de Santa Maria), a obtida pelo aplicativo SmartIRI (em ambas as cidades, conforme a etapa de análise dos dados), e os valores de RMSVA pelo aplicativo SensorLab, como mencionado.

Estes gráficos gerados, para Bisconsini (2016), geram curvas e coeficientes de correlação que avaliam quão próxima é a ligação entre os dados fornecidos pelo *smartphone* e a irregularidade longitudinal. As graficações geram um valor de coeficiente de correlação e determinação para cada caso.

Por isso é importante saber que para a relação RMSVA e IRI ser possível é preciso “utilizar equações que não cruzem a origem, já que, se o IRI for igual a 0 m/km a aceleração vertical medida também deverá ser igual a  $0\text{ m/s}^2$ ” (BISCONSINI, 2016).

O coeficiente de correlação R pode variar de -1 a 1, quanto mais próximo ao valor de 1, maior é a relação linear entre as variáveis, por consequência, quanto mais próximo a -1 a variável estiver considera-se que a correlação é inversa, ou seja, os valores estão afastados.

Assim como para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que varia de 0 a 1, quanto mais próximo de 1 maior é a relação entre os valores e a linha de tendência gerada, ou seja, ele define em que percentagem a variável dependente IRI é explicada pelas variáveis independentes (MAGALHÃES, 2019).

Esses valores foram conhecidos com a utilização do software excel que disponibiliza em sua interface uma análise de dados a partir da regressão linear, que gera um intervalo de confiança dos valores de até 95%, que de acordo com Magalhães (2019) significa que, para inferência estatística, é considerado um erro de apenas 5% e que, com 95% de confiança, é possível estabelecer inferências da amostra para a população.

Diante do exposto foram gerados para cada via os gráficos e tabelas que relacionam os dados de Santa Maria:

- a) IRI perfilômetro x IRI SmartIRI – carro S10
- b) IRI perfilômetro x IRI SmartIRI – carro Civic
- c) IRI perfilômetro x RMSVA SensorLab – carro S10
- d) IRI perfilômetro x RMSVA SensorLab – carro Civic

E para os dados de Alegrete, em cada via:

- a) IRI SmartIRI x RMSVA SensorLab

Ainda, com as equações obtidas é feita uma relação entre os coeficientes de correlação entre os dados de Santa Maria e Alegrete. Assim é possível identificar quais trechos avaliados precisam de manutenção e em que nível, com base na bibliografia estudada.

## 4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

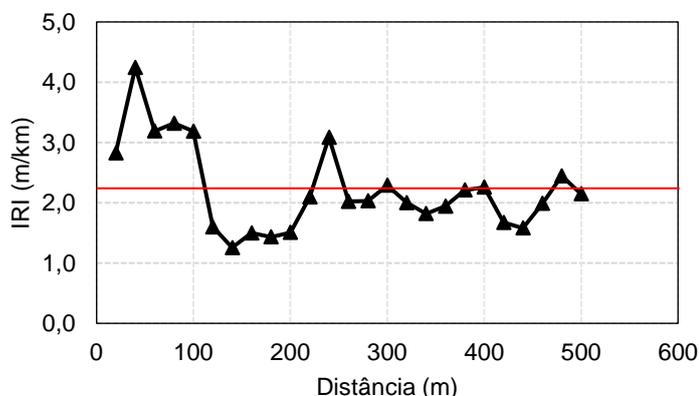
A partir dos procedimentos realizados para a obtenção dos dados, apresentado ao longo do Capítulo 3, chega-se aos resultados obtidos com este trabalho. A ideia inicial sempre foi se apropriar dos dados advindos do perfilômetro inercial a laser, utilizado em Santa Maria, como valores de referência para nortear a relevância dos resultados obtidos com os *smartphones*.

### 4.1 Resultados de Santa Maria

#### 4.1.1 Trecho 1

Com a média dos 10 percursos realizadas com o perfilômetro inercial a laser, foi possível chegar ao perfil longitudinal da Figura 25, unindo 25 pontos distanciados de 20 em 20 metros, em um total de 500 metros percorridos.

Figura 25 – Perfil longitudinal Trecho 1



Fonte: Elaboração própria

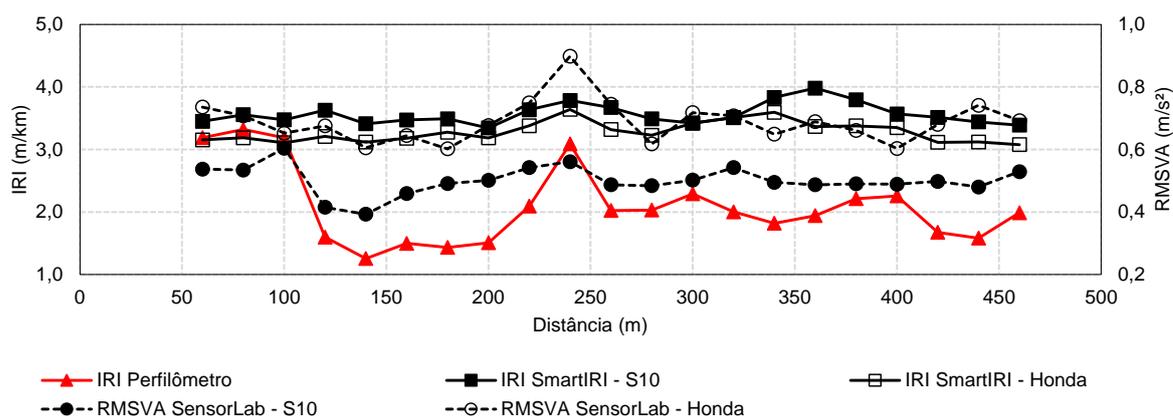
Na Figura 25 é possível notar que alguns pontos se acentuam em relação aos demais, demonstrando que em parte da via há um maior conjunto de irregularidades. Com a média dos valores de IRI do perfil obtém-se o IRI médio de 2,23 m/km, como marca a linha horizontal vermelha.

De acordo com os valores determinados pelo DNIT, e apresentados na Tabela 2, o valor de IRI médio encontrado classifica, a partir de uma escala, o pavimento como bom. Porém nota-se que existe um ponto à 40 metros do ponto

inicial do trecho que merece uma atenção maior, pois recebe classificação de trecho ruim por possuir um IRI superior à 3,5 m/km.

É possível comparar na Figura 26 o perfil longitudinal formado pelo perfilômetro inercial a laser com as curvas geradas a partir dos levantamentos com os *smartphones*, tanto no carro em que estava o perfilômetro, como no Civic.

Figura 26 – Perfis longitudinais para o Trecho 1



Fonte: Elaboração própria

Para a elaboração da Figura 26 foi necessário um ajuste das curvas, para que as cinco iniciassem no mesmo ponto de levantamento. Isso foi necessário porque, como explicado anteriormente, a operação de iniciar e finalizar os levantamentos foi feita de maneira manual. Com isso, a quantidade de pontos e a distância total do percurso para comparativo dos dados, foi reduzida, totalizando para cerca de 400 metros.

Analisando a Figura 26 é visualmente perceptível que as 5 curvas possuem um ponto de maiores defeitos na via. Considerando o perfilômetro inercial a laser como equipamento referência, percebe-se que as curvas obtidas durante o ensaio com o veículo Civic foram as que tiveram maior semelhança com a curva do perfilômetro inercial a laser, sendo a curva adquirida com os dados do SensorLab (carro Civic) a que apresenta maior similaridade.

Isso pode ter ocorrido neste trecho porque a configuração do sistema de suspensão do Civic é mais rígida que do que o da S10, tendo assim uma menor absorção do movimento vertical durante o deslocamento, transmitindo a

irregularidade de forma mais acentuada para o *smartphone*. A média dos valores de RMSVA e IRI obtidos com cada perfil longitudinal está apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Médias Trecho 1

	<b>Média IRI (m/km)</b>	<b>Média RMSVA (m/s<sup>2</sup>)</b>
<b>Perfilômetro</b>	2,23	-
<b>SmartIRI (S10)</b>	3,57	-
<b>SensorLab (S10)</b>	-	0,51
<b>SmartIRI (Civic)</b>	3,29	-
<b>SensorLab (Civic)</b>	-	0,69

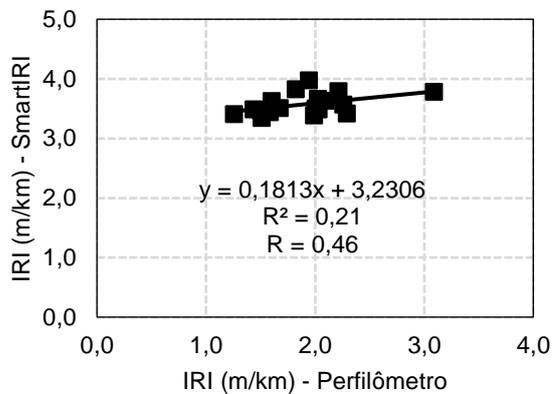
Fonte: Elaboração própria

Importante ressaltar que para a média dos valores do perfilômetro o cálculo tem como base a classificação disponível pelo DNIT (2006), diferente do caso do SmartIRI, que tem como base a classificação determinada por Almeida (2018), como já citado. Por isso, mesmo com os valores na escala 3m/km, o valor de média do aplicativo SmartIRI é classificado pela escala como bom, como descrito da Tabela 4.

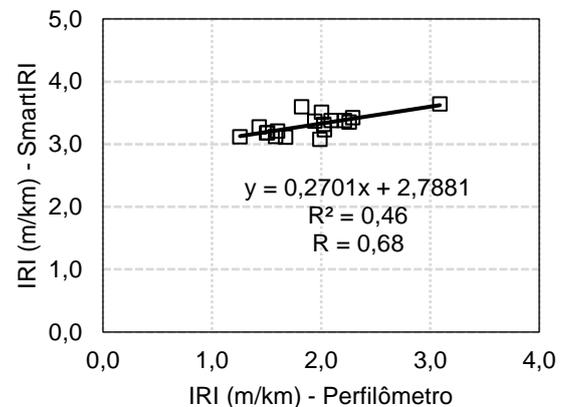
Para que a relação entre IRI e RMSVA seja possível, faz-se necessário um gráfico de dispersão que gera um coeficiente de correlação (R) e um coeficiente de determinação R<sup>2</sup>. Assim, na Figura 27 estão apresentados os resultados encontrados para cada um dos aplicativos e carros comparados com os valores de IRI dados pelo perfilômetro inercial a laser.

Figura 27 – Correlações entre IRI e RMSVA Trecho 1

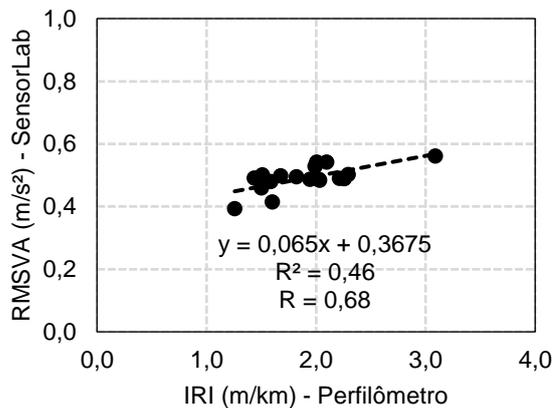
a) Perfilômetro x SmartIRI S10



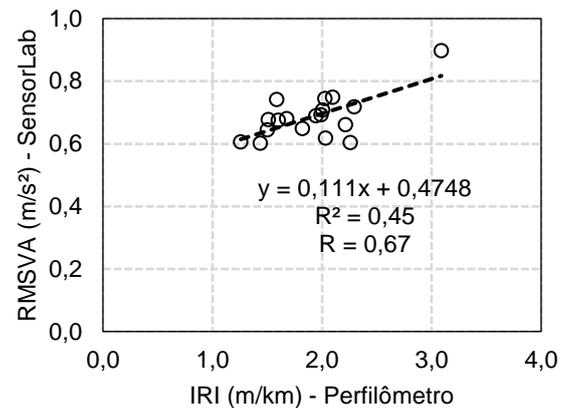
b) Perfilômetro x SmartIRI Civic



c) Perfilômetro X SensorLab S10



d) Perfilômetro x SensorLab Civic



Fonte: Elaboração própria

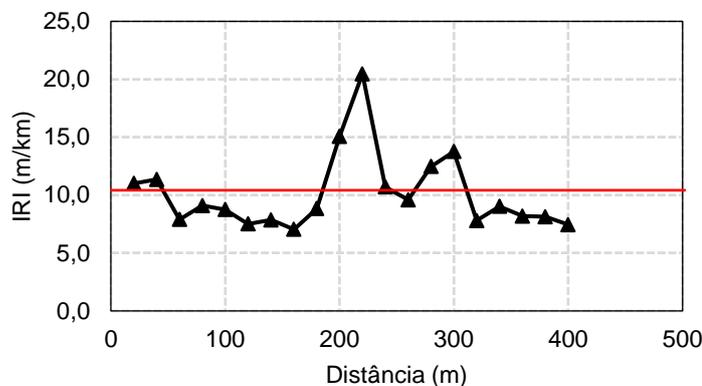
Com a mesma quantidade de dados para geração das correlações, foi possível obter valores de coeficiente de variação de 0,46, 0,67 e 0,68 e de coeficientes de determinação de 0,21, 0,46 e 0,45. Um resultado que demonstra que os dados do perfilômetro inercial a laser com os dados do SmartIRI, quando no carro S10, possuem um menor coeficiente de variação e determinação em relação as outras correlações.

#### 4.1.2 Trecho 2

Para o Trecho 2, que se trata de um pavimento em paralelepípedo, também foi elaborado um perfil longitudinal, apresentado no Figura 28. Neste caso a soma

dos valores médios contabilizou 20 valores, separados de 20 em 20 metros, que somam 400 metros de levantamento no trecho.

Figura 28 – Perfil Longitudinal Trecho 2



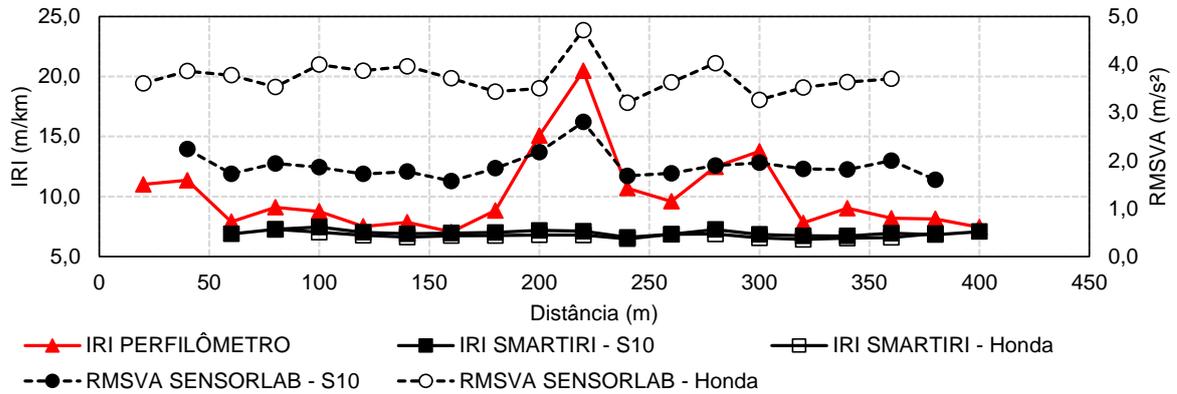
Fonte: Elaboração própria

No perfil em questão é possível visualizar um pico que se sobressai em relação aos outros pontos, com um IRI próximo a 20 m/km. A média do IRI encontrado para o perfilômetro inercial a laser foi de 10,10 m/km, um valor distante em relação ao ponto de grande irregularidade encontrado.

A justificativa para tal fator não está clara, pois durante o ensaio uma variação de irregularidade tão representativa na superfície do trecho não foi perceptível, como mostram os dados obtidos pelo perfilômetro inercial a laser. Contudo, como se trata de um pavimento em paralelepípedo, essas variações podem ocorrer, já que o material utilizado para o revestimento é de bastante irregularidade.

Quando a Figura 28 é inserida junto as curvas longitudinais geradas pelos demais dispositivos e do Civic, tem-se a Figura 29.

Figura 29 – Perfis longitudinais para o Trecho 2

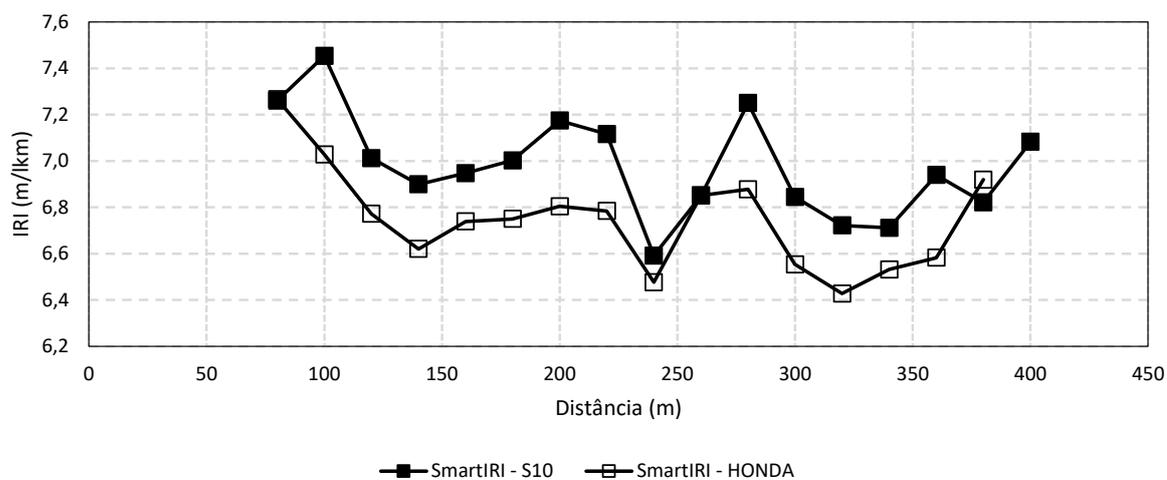


Fonte: Elaboração própria

Para a Figura 29 também foi necessário ajustar os valores para que o ponto inicial e final do levantamento coincidisse. Neste gráfico é possível observar que a irregularidade saliente do perfilômetro inercial a laser se sobressai em relação as outras curvas, isso porque apesar dos outros equipamentos identificarem pontos de pico (Apêndice A), quando comparados com as escalas apropriadas o ponto é suavizado, principalmente o perfil longitudinal formado pelos resultados do SmartIRI.

Como mostra a Figura 30, quando feito o perfil longitudinal dos valores que correspondem a média dos 10 percursos referentes aos dados do aplicativo SmartIRI, é possível perceber que há pontos de pico, que apresentam um acúmulo de defeitos do pavimento no trecho quando a uma distância de 200 e 280 metros do ponto marcado como início do levantamento.

Figura 30 – Perfil longitudinal com dados do aplicativo SmartIRI para o Trecho 2



Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 7 estão as médias correspondentes as curvas apresentadas na Figura 29. De acordo com a classificação do DNIT (2006) para o Trecho 2 a escala indica o pavimento como péssimo, contudo, trata-se aqui de um pavimento de paralelepípedo, não compreendido pela escala do DNIT que se refere apenas a pavimentos asfálticos.

Tabela 7 – Médias Trecho 2

	Média IRI (m/km)	Média RMSVA (m/s <sup>2</sup> )
<b>Perfilômetro</b>	10,10	-
<b>SmartIRI (S10)</b>	6,98	-
<b>SensorLab (S10)</b>	-	1,90
<b>SmartIRI (Civic)</b>	6,75	-
<b>SensorLab (Civic)</b>	-	3,72

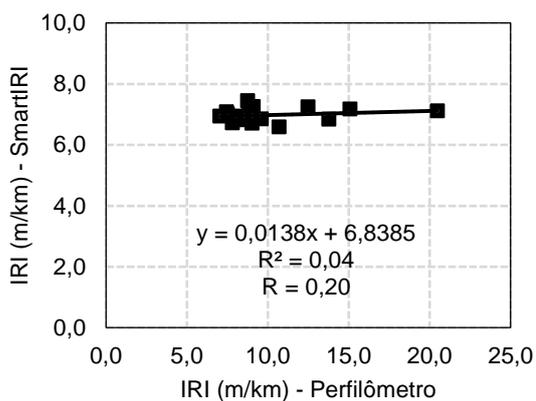
Fonte: Elaboração própria

A classificação proposta por Almeida (2018) para o SmartIRI define que os valores de IRI acima de 6m/km são considerados como ruins (Tabela 4), o que difere da consideração feita para o valor do perfilômetro para este trecho. Importante perceber que as médias do SmartIRI entre carro Civic e S10 se assemelham, diferentemente da média entre os carros para o aplicativo SensorLab, o que é compreendido como uma suavização das irregularidades por parte do carro S10.

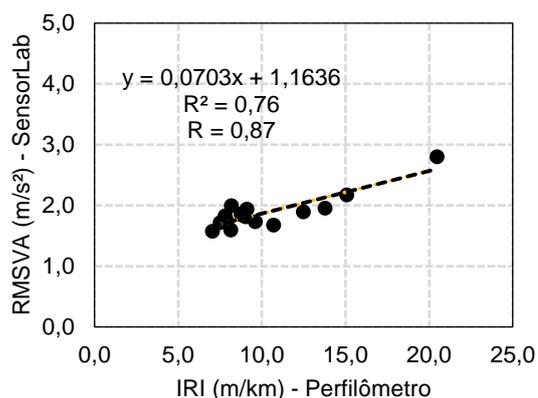
Por fim, para que se possa comparar os resultados de IRI e RMSVA novamente, apropria-se da linha de tendência e dos coeficientes de correlação e determinação para definir os pontos semelhantes entre os resultados, visível na Figura 31.

Figura 31 – Correlação entre IRI e RMSVA Trecho 2

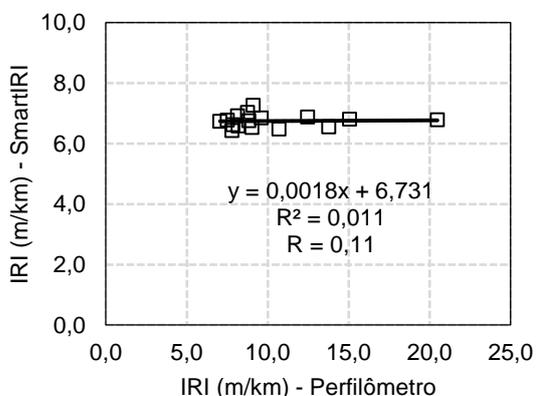
a) Perfilômetro x SmartIRI S10



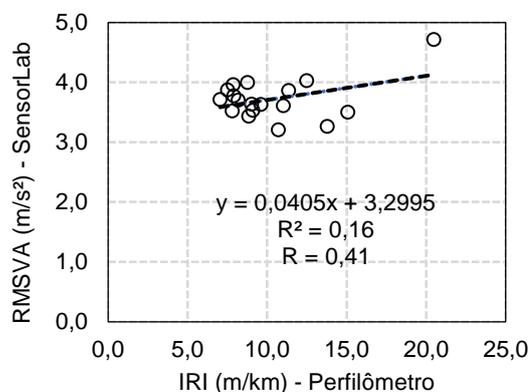
c) Perfilômetro x SensorLab S10



b) Perfilômetro x SmartIRI Civic



d) Perfilômetro x SensorLab Civic



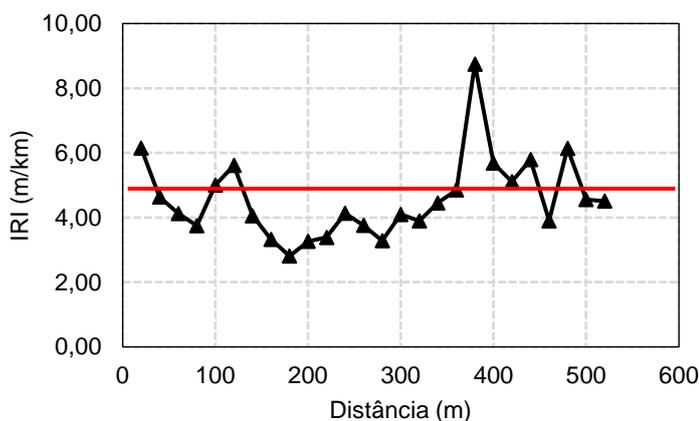
Fonte: Elaboração própria

As correlações permitiram encontrar, após ajustes para igual número de dados, valores de coeficientes de correlação e determinação bastante baixos em comparação com o Trecho 1 e com o valor de referência para resultados positivos máximos ( $R=1$  e  $R^2=1$ ). Exceto para os coeficientes encontrados para o aplicativo SensorLab quando no carro S10, com valores de  $R=0,87$  e  $R^2=0,76$ , que significam que entre os dados do aplicativo e do perfilômetro há uma boa relação entre as variáveis e também entre os dados e a linha de tendência gerada.

### 4.1.3 Trecho BR 287

Para o último trecho estudado na cidade de Santa Maria, a BR 287, foi possível capturar, dentro da média feita para 10 percursos, 26 pontos de 20 em 20 metros que totalizaram uma distância 520 metros. O perfil longitudinal do trecho, de acordo com os resultados do perfilômetro, está apresentado na Figura 32.

Figura 32 – Perfil longitudinal Trecho BR 287

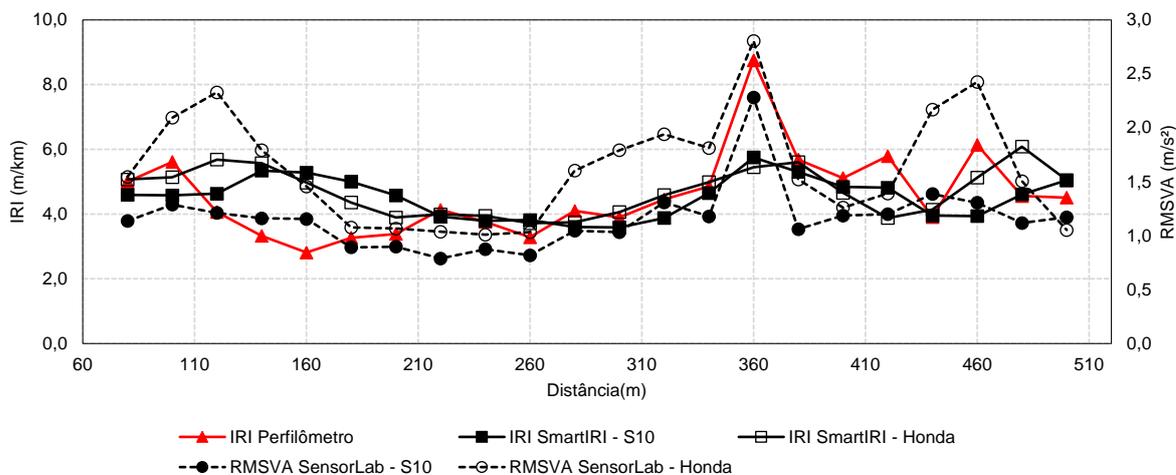


Fonte: Elaboração própria

Para este último trecho de Santa Maria também é possível perceber picos proeminentes de IRI, que demonstram uma maior irregularidade na localidade. A média de IRI neste pavimento foi de 4,58 m/km, como delimita a linha vermelha horizontal na Figura 32.

Ao reunir este perfil longitudinal com os demais adquiridos por outros aparelhos ao longo do mesmo trecho, obtém-se a Figura 33.

Figura 33 – Perfis longitudinais para o Trecho BR 287



Fonte: Elaboração própria

É possível visualizar na Figura 33 que as curvas possuem maior semelhança, em relação as Figuras 26 e 29, isso pode se justificar pela localização permitir uma maior quantidade de satélites disponíveis, contribuindo para a acurácia dos resultados.

Nota-se ainda na Figura 33 que o perfil das curvas obtido com o SensorLab, para os dois veículos, se assemelhou muito com o perfil da curva encontrada através dos dados obtidos com o perfilômetro inercial a laser.

Quando comparadas as médias entre os métodos utilizados, como mostra a Tabela 8, nota-se que as médias entre as curvas (perfilômetro com o SmartIRI) também estão bem próximas, validando a análise visual.

Tabela 8 – Médias Trecho BR 287

	<b>Média IRI (m/km)</b>	<b>Média RMSVA (m/s<sup>2</sup>)</b>
<b>Perfilômetro</b>	4,58	-
<b>SmartIRI (S10)</b>	4,48	-
<b>SensorLab (S10)</b>	-	1,15
<b>SmartIRI (Civic)</b>	4,72	-
<b>SensorLab (Civic)</b>	-	1,63

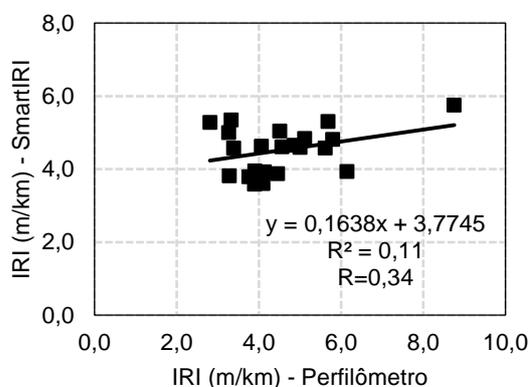
Fonte: Elaboração própria.

Um IRI maior que 4m/km tanto para a classificação do DNIT como a apresentada pelo SmartIRI, é considerado pela escala como regular ou ruim, o que de acordo com a Tabela 3 é um pavimento já defeituoso, com depressões ocasionais e ondulações moderadas.

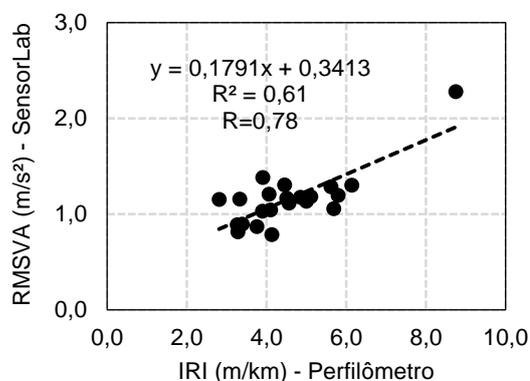
Para auxiliar na compreensão da relação entre os resultados obtidos e o perfilômetro inercial a laser, apresenta-se a Figura 34.

Figura 34 – Correlação entre IRI e RMSVA Trecho BR 287

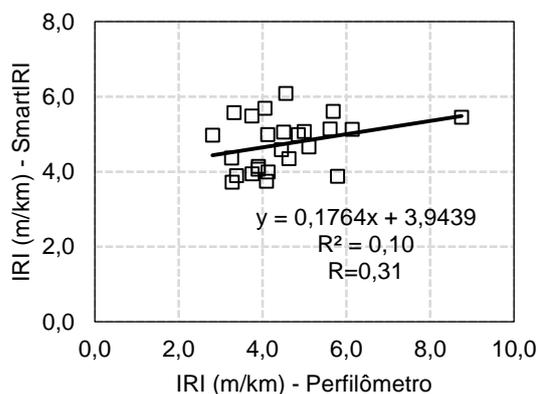
a) Perfilômetro x SmartIRI S10



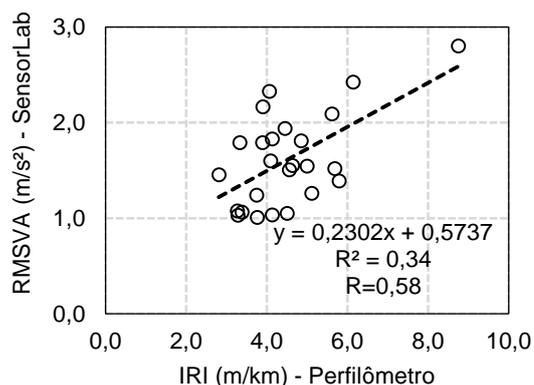
c) Perfilômetro x SensorLab S10



b) Perfilômetro x SmartIRI Civic



d) Perfilômetro x SensorLab Civic



Fonte: Elaboração própria

Da mesma maneira que para o Trecho 2, os coeficientes encontrados no Trecho BR 287 para o aplicativo SensorLab, tanto no carro S10 como no Civic, quando correlacionados com os valores obtidos pelo perfilômetro inercial a laser, apresentaram maiores valores dos coeficientes de correlação e determinação do que a correlação entre os valores do aplicativo SmartIRI com o perfilômetro inercial a

laser. O que significa que o valor da irregularidade longitudinal avaliada pelo perfilômetro inercial a laser tem uma correlação percentualmente maior com os dados do SensorLab do que com os dados encontrados para o SmartIRI, neste trecho.

## 4.2 Resultados de Alegrete

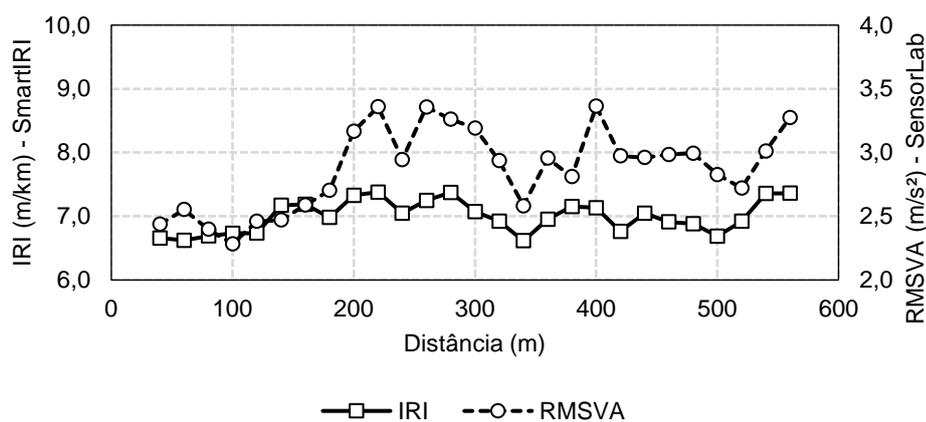
Como não houve utilização do perfilômetro inercial a laser, as relações aqui apresentadas têm como base somente a utilização dos aplicativos SmartIRI e SensorLab, para o carro Civic.

### 4.2.1 Avenida Eurípedes Brasil Milano

A Avenida Eurípedes Brasil Milano foi o primeiro pavimento de Alegrete na qual os levantamentos foram feitos. No “Apêndice A” é possível encontrar os perfis longitudinais que permitiram a elaboração da média dos 10 percursos, com base no alinhando de início e fim do levantamento.

Na Figura 35 é possível observar os perfis longitudinais gerados por ambos os aplicativos para o trecho estudado. A média de ambas as curvas contabilizam um total de 27 valores de 20 em 20 metros que totalizam uma distância de 560 metros.

Figura 35 – Perfis longitudinais para Av. Eurípedes Brasil Milano



Fonte: Elaboração própria

Pela Figura 35 percebe-se que os perfis se alinham de alguma forma nas distâncias de 200 a 400 metros, isto é, na existência de picos e vales que formam o

perfil longitudinal. Os valores médios de irregularidade longitudinal e aceleração da gravidade para ambos os perfis estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Médias da Av. Eurípedes Brasil Milano

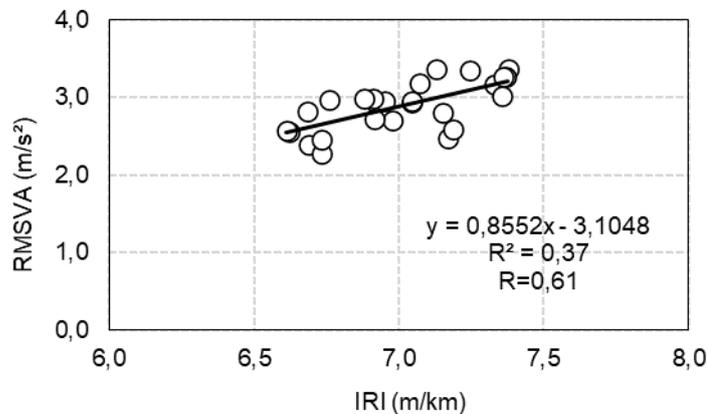
	Média IRI (m/km)	Média RMSVA (m/s <sup>2</sup> )
<b>SmartIRI</b>	6,99	-
<b>SensorLab</b>	-	2,89

Fonte: Elaboração própria.

Neste caso, leva-se em conta apenas a classificação disposta por Almeida (2018), que indica na Tabela 4 que para um valor de IRI de 6,99 m/km o pavimentado é avaliado pela escala como ruim.

Relacionado os valores de IRI e RMSVA encontrados, é possível construir a Figura 36, que avalia a proximidade entre os dados.

Figura 36 – Correlação entre IRI e RMSVA Av. Eurípedes Brasil Milano



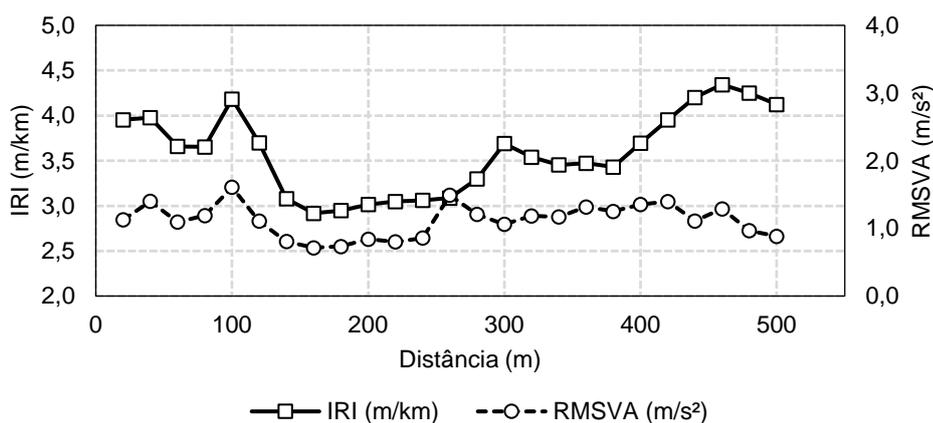
Fonte: Elaboração própria

Assim, como mostra a Figura 36, o coeficiente de determinação entre os valores de IRI e RMSVA é de  $R^2=0,37$ , e o coeficiente de variação é de  $R=0,61$  representando uma boa porcentagem de dependência entre as variáveis e também entre os dados e a linha de tendência gerada.

## 4.2.2 Avenida Tiarajú

Para a Avenida Tiarajú também foram gerados dois perfis longitudinais do levantamento, um com o aplicativo SensorLab e outro com o aplicativo SmartIRI. Neste trecho obteve-se os perfis com uma extensão total do trecho de 500 metros. Estas informações podem ser visualizadas na Figura 37.

Figura 37 – Perfis longitudinais para a Av. Tiarajú



Fonte: Elaboração própria

Ao observar a Figura 37 é possível notar algumas semelhanças entre ambas as curvas, principalmente um ponto que está bastante acentuado quando há 100 metros de distância do ponto delimitado como inicial e o vale entre as distâncias de 140 e 240 metros. As médias de valores encontrados estão com base em 25 pontos obtidos nos levantamentos, e podem se visualizadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Médias da Avenida Tiarajú

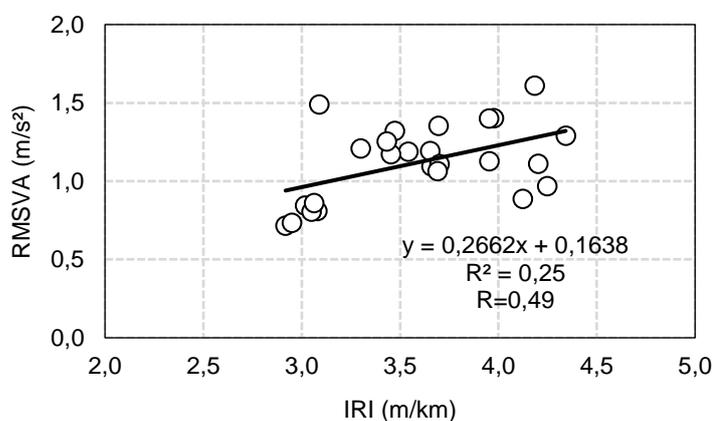
	Média IRI (m/km)	Média RMSVA (m/s²)
<b>SmartIRI</b>	3,59	-
<b>SensorLab</b>	-	1,12

Fonte: Elaboração própria

De acordo com os valores calculados disponibilizados na Tabela 10, o aplicativo SmartIRI chega a uma média de 3,59 m/km para o trecho estudado, o que

de acordo com Almeida (2018) se classifica como um pavimento de nível bom (Tabela 4). A relação entre IRI e RMSVA encontrada para esta via está na Figura 38.

Figura 38 – Correlação entre IRI e RMSVA Av. Tiarajú



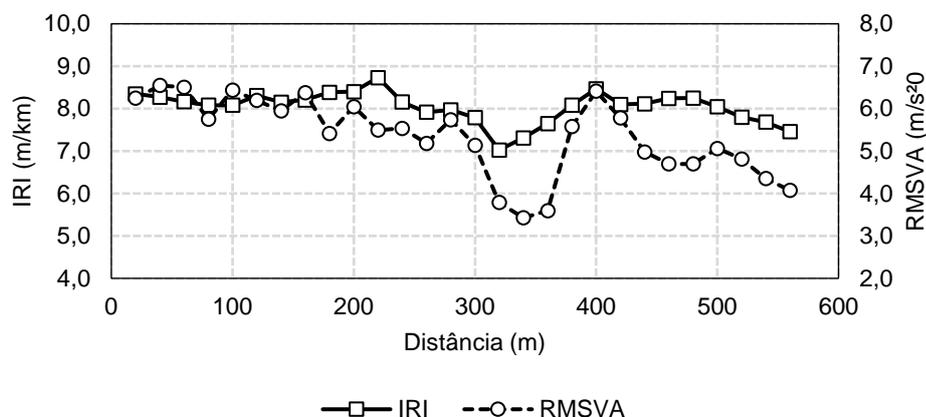
Fonte: Elaboração própria

Ao analisar a Figura 38 verifica-se que o  $R^2$  é de 0,25 e o R igual a 0,49, um valor que significa que os resultados não possuem uma boa correlação entre si e entre a linha de tendência, assim como podem ser considerados inferiores quando comparados a Figura 36.

#### 4.2.3 Rua Barros Cassal

Por fim, o último trecho estudado em Alegrete foi a Rua Barros Cassal, com um pavimento de paralelepípedo. Assim como para os outros trechos, o perfil longitudinal da via foi elaborado para os resultados adquiridos pelos aplicativos SmartIRI e SensorLab, como apresenta a Figura 39.

Figura 39 – Perfis longitudinais para a Rua Barros Cassal



Fonte: Elaboração própria

É possível visualizar com a Figura 39 que mais uma vez os dados se aproximam visualmente, principalmente no ponto marcado pela distância de 400 metros após o ponto definido como começo do levantamento. Isso mostra a confiabilidade na utilização de ambos os aplicativos para obtenção dos perfis de irregularidade longitudinal dos pavimentos.

A média das curvas foram realizadas com base em 28 pontos separados entre si de 20 em 20 metros, que somaram 560 metros da via. Estes valores são observados na Tabela 11.

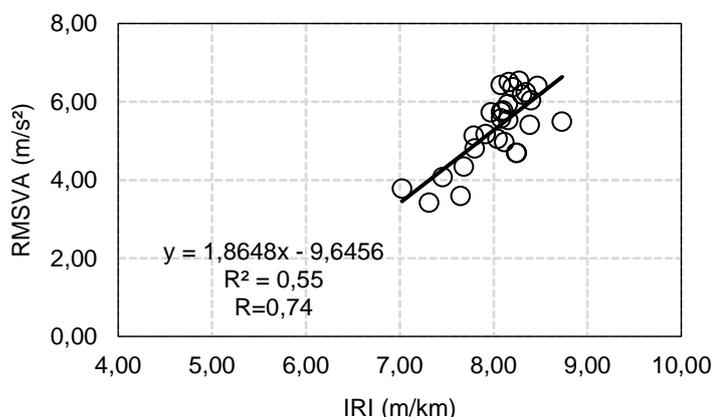
Tabela 11 – Médias para a Rua Barros Cassal

	Média IRI (m/km)	Média RMSVA (m/s²)
<b>SmartIRI</b>	8,04	-
<b>SensorLab</b>	-	5,35

Fonte: Elaboração própria

O valor de 8,04 m/km encontrado para IRI classifica de acordo com a Tabela 4 o trecho como um pavimento de qualidade ruim, contudo, novamente trata-se de uma via de paralelepípedo, o que dificulta sua classificação pela tabela mencionada. A sua relação com os valores de RMSVA pode ser observado na Figura 40.

Figura 40 – Correlação entre IRI e RMSVA Rua Barros Cassal



Fonte: Elaboração própria

Ao avaliar a Figura 40, percebe-se que esta apresentou resultados mais satisfatórios para os valores encontrados de coeficientes de correlação ( $R=0,74$ ) e determinação ( $R^2=0,55$ ). Desta forma pode-se dizer que a curva de tendência representa de forma satisfatória a relação entre as variáveis para este trecho, assim como o coeficiente de correlação ( $R$ ) mostra que existe uma boa relação entre IRI e RMSVA nos dados da Rua Barros Cassal.

### 4.3 Síntese dos Principais Resultados

Com os resultados apresentados e considerações já feitas no item 4.2 é possível reunir alguns aspectos para maior análise, como a média dos valores de IRI e RMSVA encontrados para cada trecho, equipamento e carro utilizado.

Esses valores se encontram na Tabela 12 e a partir deles é possível visualizar que os únicos trechos identificados como bons foram o Trecho 1, localizado em Santa Maria, e a Avenida Tiarajú, em Alegrete, como representado pelo aplicativo SmartIRI ao longo do levantamento (Figura 41 e 42).

Tabela 12 – Médias para todos os trechos de estudo

Trecho / Rua	Metodologia - Carro	IRI médio (m/km)	RMSVA médio	Classificação
<b>Santa Maria</b>				
<b>Trecho 1</b>	Perfilômetro	2,23	-	Bom
	SmartIRI - S10	3,57	-	
	SmartIRI – Civic	3,29	-	
	SensorLab – S10	-	0,51	
	SensorLab - Civic	-	0,69	
<b>Trecho 2</b>	Perfilômetro	10,10	-	-
	SmartIRI - S10	6,98	-	
	SmartIRI – Civic	6,75	-	
	SensorLab – S10	-	1,90	
	SensorLab - Civic	-	3,72	
<b>Trecho BR 287</b>	Perfilômetro	4,58	-	Regular/Ruim
	SmartIRI - S10	4,48	-	
	SmartIRI – Civic	4,72	-	
	SensorLab – S10	-	1,15	
	SensorLab - Civic	-	1,63	
<b>Alegrete</b>				
<b>Av. Eurípedes Brasil Milano</b>	SmartIRI - SensorLab	6,99	2,89	Ruim
<b>Av. Tiarajú</b>	SmartIRI - SensorLab	3,59	1,12	Bom
<b>Rua Barros Cassal</b>	SmartIRI - SensorLab	8,04	5,35	-

Fonte: Elaboração própria

Com a Tabela 12 também é identificado que dois trechos de Alegrete (Av. Eurípedes Brasil Milano e Rua Barros Cassal) e um trecho de Santa Maria (Trecho BR 287) foram classificadas pela escala como ruins.

Acredita-se que se fosse possível classificar pela escala do DNIT a Rua Barros Cassal e o Trecho 2, ambas de paralelepípedo, elas seriam classificadas como péssimas, pois possuem um IRI maior que 6 m/km.

Para indicar a classificação, Almeida (2018) na elaboração do aplicativo SmartIRI optou por adotar cores que indiquem de maneira mais visual a qualidade em que a via se encontra, de acordo com a sua escala. Como demonstrado nas Figuras 41 e 42, a cor verde claro foi adotada como indicativo de via boa. Já como

demonstram as Figuras 43, 44, 45 e 46, a cor laranja aponta para um pavimento regular e a cor vermelha se refere a uma classificação ruim. Ainda, a cor verde escuro apareceria no caso de uma via em condições excelentes, o que não foi encontrado em nenhum trecho analisado neste trabalho.

Figura 41 – Captura de imagem Trecho 1



Fonte: Aplicativo SmartIRI (2021)

Figura 42 – Captura de imagem Av. Tiarajú



Fonte: Aplicativo SmartIRI (2021)

Figura 43 – Captura de imagem Trecho 2



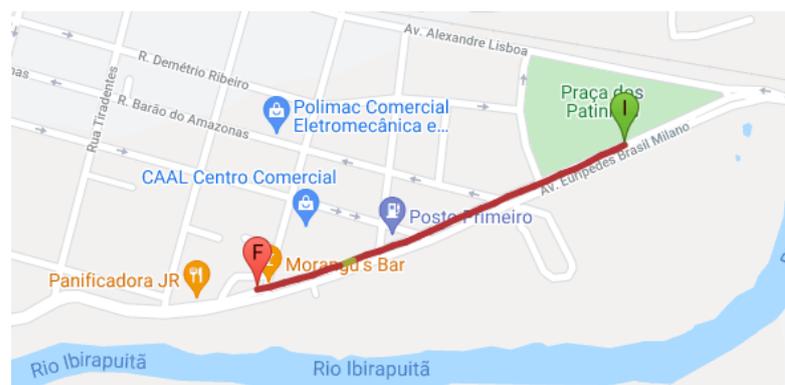
Fonte: Aplicativo SmartIRI (2021)

Figura 44 – Captura de imagem Trecho BR 287



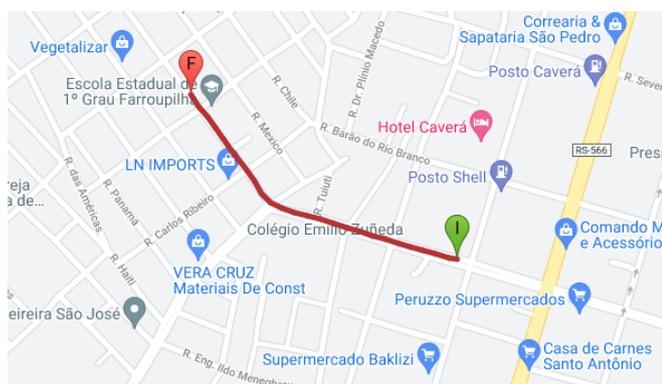
Fonte: Aplicativo SmartIRI (2021)

Figura 45 – Captura de imagem Av. Eurípedes Brasil Milano



Fonte: Aplicativo SmartIRI (2021)

Figura 46 – Captura de imagem Rua Barros Cassal



Fonte: Aplicativo SmartIRI (2021)

É importante observar que pela Figura 44 o Trecho BR 287 não tem uma consistência em todo o trajeto como nas restantes, isto é, algumas regiões apresentam boas condições. Contudo, a classificação definida para os trechos estudados tem como base a média dos pontos, o que justifica a avaliação adotada.

Outra questão a ser levantada são os resultados apresentados nas Figuras 26, 29 e 33, que apresentam um “achatamento” do perfil longitudinal dos dados referente ao aplicativo SmartIRI quando disposto no painel do veículo S10. Apesar de individualmente os pontos de pico estarem visíveis (Apêndice A), mesmo que suaves, quando junto ao perfil de IRI encontrado com o perfilômetro inercial a laser, estas deformações se mostraram imperceptíveis.

Acredita-se que este fator esteja ligado a suspensão do veículo S10, que pode “amortecer” as deformações, assim como pelo motivo de que o aplicativo foi calibrado para um carro HB20, que possui uma suspensão de mesmo sistema do Civic utilizado.

Magalhães (2019) enfatiza que as irregularidades do pavimento tendem a provocar menores vibrações nos veículos quando trafegando a velocidades mais baixas, assim como um veículo com uma suspensão mais rígida será menos influenciado pelas irregularidades existentes no pavimento do que um veículo com suspensão mais macia.

Ainda quanto aos gráficos, nos casos das Figura 26, 35 e 37, fica visível que pontos semelhantes estão próximos, mas não alinhados. Muito provável que estas irregularidades estejam localizadas em campo a uma mesma distância do início do levantamento, contudo, isto pode estar relacionado com a velocidade que os carros

atingiram ou com a precisão dos aplicativos entre si. Apesar de uma média de velocidade de deslocamento ter sido mantida durante os 10 percursos em cada trecho com cada veículo (Tabela 13), durante os ensaios haviam variações de velocidade, e esta diferença pode ter influenciado na delimitação gráfica.

Tabela 13 – Velocidade dos pavimentos estudados

<b>Trecho/Rua</b>	<b>Velocidade (km/h)</b>
<b>Trecho 1</b>	40
<b>Trecho 2</b>	30
<b>Trecho BR 287</b>	50
<b>Av. Eurípedes Brasil Milano</b>	40
<b>Av. Tiarajú</b>	40
<b>Rua Barros Cassal</b>	30

Fonte: Elaboração própria

Quanto as velocidades trafegadas, para o trecho da Rua Eurípedes Brasil Milano a velocidade permitida é de 30km/h como mencionado anteriormente, contudo, com o intuito de obter os dados com o veículo a uma maior velocidade, utilizou-se 40 km/h.

Ainda, para a conclusão deste estudo, também é preciso analisar os gráficos, equações e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e de correlação (R) que foram gerados para cada um dos pavimentos estudados. Em resumo estes dados se encontram na Tabela 14.

Tabela 14 – Equações, R<sup>2</sup> e R para os trechos estudados

Trecho / Rua	Perfilômetro x Aplicativo - Carro	Equação	R <sup>2</sup>	R
<b>Santa Maria</b>				
<b>Trecho 1</b>	SmartIRI - S10	IRI=0,1813.IRI+3,2306	0,21	0,46
	SmartIRI – Civic	IRI=0,2701.IRI+2,7881	0,46	0,68
	SensorLab – S10	IRI=0,065.RMSVA+0,3675	0,46	0,68
	SensorLab - Civic	IRI=0,111.RMSVA+0,4748	0,45	0,67
<b>Trecho 2</b>	SmartIRI - S10	IRI=0,0138.IRI+6,8385	0,04	0,20
	SmartIRI – Civic	IRI=0,0018.IRI+6,731	0,011	0,11
	SensorLab – S10	IRI=0,0703.RMSVA+1,1636	0,76	0,87
	SensorLab - Civic	IRI=0,0405.RMSVA+3,2995	0,16	0,41
<b>Trecho BR 287</b>	SmartIRI - S10	IRI=0,1638.IRI+3,7745	0,11	0,34
	SmartIRI – Civic	IRI=0,1764.IRI+3,9439	0,10	0,31
	SensorLab – S10	IRI=0,1791.RMSVA+0,3413	0,61	0,78
	SensorLab - Civic	IRI=0,2302.RMSVA+0,5737	0,34	0,58
<b>Alegrete</b>				
<b>Av. Eurípedes Brasil Milano</b>	SmartIRI X	IRI=0,8552.RMSVA-3,1048	0,37	0,61
	SensorLab			
<b>Av. Tiarajú</b>	SmartIRI X	IRI=0,2662.RMSVA+0,1638	0,25	0,49
	SensorLab			
<b>Rua Barros Cassal</b>	SmartIRI X	IRI=1,8648.RMSVA-9,6456	0,55	0,74
	SensorLab			

Fonte: Elaboração própria

Em todos os gráficos de dispersão gerados para correlação entre os dados tiveram no eixo das abscissas os valores de IRI gerados pelo perfilômetro inercial a laser ou pelo SmartIRI (quando em Alegrete) e no eixo das ordenadas os valores de IRI encontrados pelo SmartIRI (quando em Santa Maria) e valores de RMSVA (em todos os casos). Dito isso, na Tabela 14, as equações geradas têm como “y” os

valores dispostos nos eixos das ordenadas e “x” os dados disponíveis no eixo das abscissas.

Em análise à Tabela 14 observa-se que o Trecho 2 apresentou os menores e maiores valores de coeficiente de variação e determinação entre os dados obtidos neste trabalho. Uma justificativa para este fato está na questão de que os valores apresentados foram gerados entre aplicativos e perfilômetro inercial a laser em uma via de paralelepípedo, um equipamento de maior precisão em uma via que possui um maior conjunto de defeitos, como demonstrado pelas médias encontradas para o trecho.

Assim como em Santa Maria a via de maior valor de correlação foi a de paralelepípedo, em Alegrete o mesmo se repete, pois a Rua Barros Cassal apresentou coeficientes de correlação e determinação maior em relação as avenidas de pavimento asfáltico.

Este fato é curioso, pois Bisconsini (2016) explica que o ruído produzido pelos *smartphones* tem maiores efeitos em baixas velocidades (nas vias de paralelepípedo as velocidades foram de 30km/h em média como aponta a Tabela 13), já que sua amplitude se aproxima do sinal de aceleração vertical medido e, com isso, diminui sua relação com a irregularidade real do pavimento, diminuindo os coeficientes.

Contudo, este efeito ocorre quando o nível de irregularidade do pavimento é baixo, o que não se aplica as vias de paralelepípedos. Mesmo assim, as acelerações verticais, o nível de irregularidade e a velocidade atingida pode ter influenciado o resultado, já que para Magalhães (2019) os maiores coeficientes de correlação podem estar ligados ao aumento da velocidade operacional, que neste caso se atribui ao aumento da irregularidade longitudinal, que gerou maiores vibrações sentidas pelos veículos em decorrência da percepção de diferentes comprimentos de onda presentes na superfície do pavimento.

Se tratando dos trechos, em um comparativo geral entre os valores da Tabela 14, nota-se que para o Trecho 1 a correlação entre perfilômetro inercial a laser e SmartIRI (carro S10) apresentou os menores coeficientes, assim como essa correlação também se manteve baixa nos outros trechos de Santa Maria.

Já para o Trecho 2, o valor dos coeficientes da correlação perfilômetro inercial a laser com SensorLab (carro S10) se sobressaiu e esteve bastante próximo de 1. Isso alerta para o fato de que em todas as vias de Santa Maria as correlações entre

perfilômetro e o aplicativo SensorLab apresentaram melhores resultados do que para o SmartIRI, independente do carro.

Se liga a estes resultados uma questão de calibração dos aplicativos, afinal, diferente do SensorLab, o aplicativo SmartIRI possui uma configuração bastante específica para o carro a ser utilizado e também a velocidade operacional, indicada para um levantamento a mais de 60km/h, o que nos trechos de estudo se tornou inviável devido a região urbana em que os pavimentos estão localizados, assim como a velocidade permitida pela via.

Por uma visão mais global da Tabela 14 é possível dizer que os valores das correlações encontradas estão abaixo das expectativas. De acordo com Magalhães (2019) maiores valores de coeficiente de variação são possíveis caso a velocidade operacional dos veículos durante a coleta seja mantida constante, se os pontos de início e fim na coleta das acelerações verticais são coincidentes, se houver um maior número de passagens dos veículos sobre o trecho e se não existir a influência do ruído gerado pelo *smartphone*, o que afeta a ordem de grandeza dos resultados, sendo tanto maior quanto menor a velocidade e menor o nível de irregularidade do pavimento.

Alguns destes aspectos foram mantidos ao longo dos levantamentos, como um maior número de percursos, a velocidade constante e o ajuste para que o início e fim do levantamento coincidisse, porém essas adequações podem ter sofrido variação, principalmente quanto a constância da velocidade e ajuste de início e fim do percurso, que estiveram a cargo dos operadores.

Ainda, também se atribui aos resultados a pouca distância de percurso final para execução da média (que diminuiu o número de dados), a não calibração do aplicativo SmartIRI para diferentes carros (que não sejam considerados de passeio) e aos ruídos ocasionados pelos veículos e também pelos aplicativos.

Magalhães (2019) também atribui aos baixos coeficientes a uma menor excitação no sistema de suspensão do veículo, diminuindo a capacidade do sistema em medir diferentes comprimentos de onda presentes no perfil do pavimento, quando em velocidades mais baixas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa o objetivo central era avaliar as condições funcionais dos pavimentos na cidade de Alegrete e Santa Maria, no Rio Grande do Sul, observando a irregularidade do pavimento com uso de um *smartphone*. Para que os dados dos aplicativos tivessem um balizador consagrado pelos órgãos rodoviários fez-se uso do perfilômetro inercial a laser.

A inspeção visual inicial para escolha dos trechos foi validada pelos dados encontrados, isto é, os valores de irregularidade longitudinal encontrados para os pavimentos, na escala IRI, indicaram que em cada cidade tinha um pavimento avaliado como bom, ruim e péssimo.

Pelos gráficos apresentados e discutidos ao longo deste trabalho fica claro que, em geral, os pontos de pico são as localidades onde mais se precisa de atenção na hora da restauração do pavimento, sendo a classificação a orientação para qual trecho necessita ser reparado com maior prioridade, neste caso o Trecho 2 em Santa Maria e a Rua Barros Cassal, em Alegrete.

Contudo, também deve-se considerar outros fatores como a importância da via para o tráfego urbano. Por exemplo, o trecho péssimo em Alegrete está em uma zona de maior tráfego urbano do que o trecho péssimo de Santa Maria, que está localizado dentro da UFSM, uma zona mais restrita da cidade.

Entre os métodos de avaliação adotados neste estudo, é possível dizer que para a obtenção dos dados com o uso de aplicativos no *smartphones* o processo é trabalhoso e necessita de um cuidado por parte do operador. Assim como, os equipamentos estão suscetíveis a influências externas que podem intervir nos valores finais.

No caso do perfilômetro inercial a laser, após muitos processos realizados por parte da equipa do laboratório da UFSM em datas anteriores, o equipamento necessitou da montagem, de uma calibração inicial dos sensores antes da execução do ensaio e por fim, da adoção de parâmetros para geração da planilha final. Além disso, os dados obtidos, como citado pela bibliografia estudada, são de grande confiabilidade, sendo este um equipamento já consagrado pelos órgãos rodoviários para avaliação da irregularidade longitudinal.

Diante do exposto é possível considerar que os objetivos deste trabalho foram alcançados e que o uso de *smartphones* como equipamentos de avaliação da irregularidade longitudinal apresenta bons resultados, principalmente com base nos valores de média de IRI que foram encontrados, contudo ainda precisa ser mais estudado para que questões mais específicas, que alterem os valores finais, sejam compreendidas.

## **6. Sugestões para trabalhos futuros**

- a) Realizar a análise da irregularidade na cidade de Alegrete utilizando perfilometria a laser, para melhores comparações;
- b) Estudar a influência da escolha dos carros utilizados, principalmente no que tange a suspensão dos veículos e velocidades de tráfego ao longo do levantamento;
- c) Replicar o estudo em rodovias que permitam uma maior velocidade operacional;
- d) Compreender outros aspectos que podem contribuir para os resultados encontrados ao se utilizar um *smartphone* como objeto de estudo, como o ruído gerado pelos aparelhos e a aquisição de dados pelos aplicativos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL TRANSPORTE TERRESTRE (org.). **IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS**: correlação entre QI e IRI e comparação de equipamentos. Nova Lima, Minas Gerais: ANTT, 2017.

ALMEIDA, Lucas Cavalcante de. **Aplicativo para smartphone destinado à medição da irregularidade longitudinal em rodovias**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

AUGUSTI, Luana Rossini; BIANCHINI, Mara Regina. Condição da malha rodoviária pavimentada do Rio Grande do Sul sob jurisdição do DAER/RS a partir de levantamentos realizados em 2018. **Revista Estradas**, Porto Alegre, v. 24, n. 18, p. 39-46, novembro 2019.

APKPURE. *In: SmartIRI*. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://apkpure.com/br/smartiri/com.smartiri>. Acesso em: outubro de 2020.

ASTEC, Engenharia. **IRI: Irregularidade Longitudinal**. Disponível em: < [www.astec.eng.br/iri](http://www.astec.eng.br/iri) > Acesso em: setembro de 2020.

ASTM E1926. **Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements**. Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. 2005.

ASTM E1364. **Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method**. 2005.

BARELLA, Rodrigo Maluf. **Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.

BISCONSINI, Danilo Rinaldi. **Avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos com dados coletados por smartphones**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

BUENO, Lucas Dotto. **Trabalho com smartphone**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <Maurício Silveira dos Santos>. em: 27 out. 2020.

BUENO, Lucas Dotto. **Contribuição para a previsão empírico-mecanicista da irregularidade longitudinal e seus desdobramentos econômicos em pavimentos asfálticos**. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

CAMPOS, Alexandre C. R. de. **Métodos de previsão de desempenho de irregularidade longitudinal para pavimentos asfálticos**: aplicação e proposição de critérios de ajuste. Campinas, SP: [s.n.], 2004.

CHAVES, José Wémenson Rabelo *et al.* Análise comparativa da irregularidade longitudinal de pavimento rodoviário em serviço por meio de aplicativos para smartphone. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 2, n. 41, p. 1-15, dezembro 2020.

CIBERMÉTRICA. **Manual de Instalação e Operação do Perfilômetro Laser para Pavimentos: Ciberlaser**. 3. ed. rev. e atual. São Paulo: Ciber métrica, [2017].

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?**. Brasília: CNT, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **009/2003 - PRO**: Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - procedimento. Rio de Janeiro: DNIT, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de gerência de pavimentos**. Rio de Janeiro, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. - Rio de Janeiro, 2006.

DUARTE, Raimundo Igor Marques *et al.* Análise comparativa da irregularidade longitudinal por faixas de tráfego obtida por aplicativo para smartphones. **Revista de Engenharia Civil Imed**, Passo Fundo, v. 2, n. 6, p. 170-185, novembro 2019.

FRANDOLOZO, Glauber. **Evolução da irregularidade longitudinal em pavimentos flexíveis restaurados**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, 2010.

GONÇALVES, F. P. **O diagnóstico e a manutenção dos pavimentos**. Passo Fundo: Universidade Passo Fundo, 1999.

MAGALHÃES, Fabrício Helder Mareco. **Procedimentos para estimar a irregularidade longitudinal do pavimento por meio de veículos calibrados, utilizando-se dados de aceleração vertical obtidos de smartphones**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

OLIVEIRA, Rodrigo Fábio S. de; ALBUQUERQUE, Fernando S. Avaliação de perfil longitudinal de pavimento de concreto de cimento Portland com perfilômetro inercial a laser. **Revista Transportes**, v. 25, n. 1, 2017.

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

ISLAM, Shahidul; Buttlar, William G.; Aldunate, Roberto G.; Vavrik, William R. **Measurement of Pavement Roughness Using Android-Based Smartphone Application**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. No. 2457, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2014, pp. 30–38.

SAYERS, M.W., Gillespie, T.D., Queiroz, C.A.V. **The International Road Roughness Experiment**. World Bank Technical Paper, nº 45, 1986.

SAYERS, M.W., Gillespie, T.D., Paterson, W.D.O.. **Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements**. World Bank Technical Paper. Nº 46, 1986.

SAYERS, M.W., Gillespie, T.D., Queiroz, C.A.V. **The International Road Roughness Experiment: A bases for establishing a Standard Scale for Road Roughness Measurements**. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1986/1084/1084-010.pdf>. Acesso em: 02 de agosto de 2020.

SAYERS, M.W., KARAMIHAS, S. M. **The Little Book of Profiling: Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles**. Universidade do Michigan. Setembro, 1998.

SCHLOTJES, M. R.; VISSER, A.; BENNET, C. **Evaluation of a smartphone roughness meter**. SOUTHERN AFRICAN TRANSPORT CONFERENCE, nº 33. Petroria: 2014, p. 7-10. Disponível em: <[http://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/45571/Visser\\_Evaluation\\_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/45571/Visser_Evaluation_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y)> Acesso em: 02 setembro 2020.

SENSORLAB. Versão 1.3. [S. l.]: LP Ellis, 2016. Disponível em: Google Play Store. Acesso em: janeiro de 2020.

SEVERO, Luis E. Paiva *et al.* **Utilização de perfilômetro laser para a medida de irregularidade longitudinal e do afundamento em trilhas de roda**. In: 9º ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Natal, RN: 2004.

SILVA, Luiz Antonio da. **Sistema de gerência de pavimentos do DER/SP**. Campinas, SP: [s.n.], 2008.

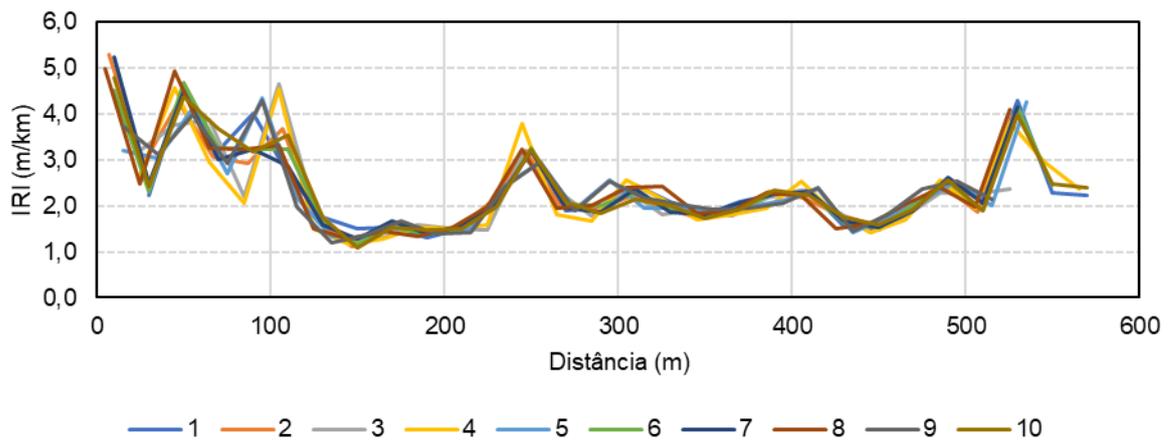
VISCONTI, Tobias S. **O sistema gerencial de pavimentos do DNER**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Dezembro, 2000.

## APÊNDICE A

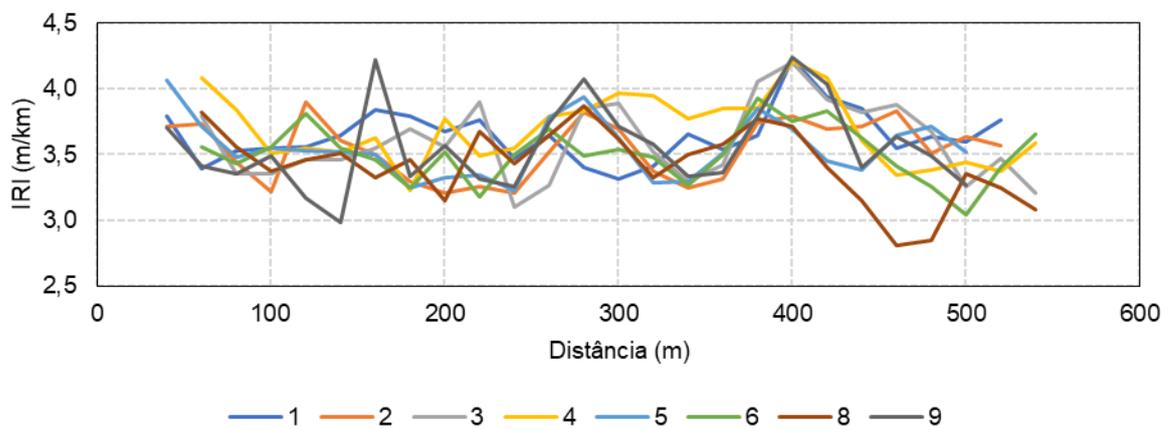
A seguir estão os perfis longitudinais encontrados para o total de percursos em cada trecho estudado.

### 1. Trecho 1

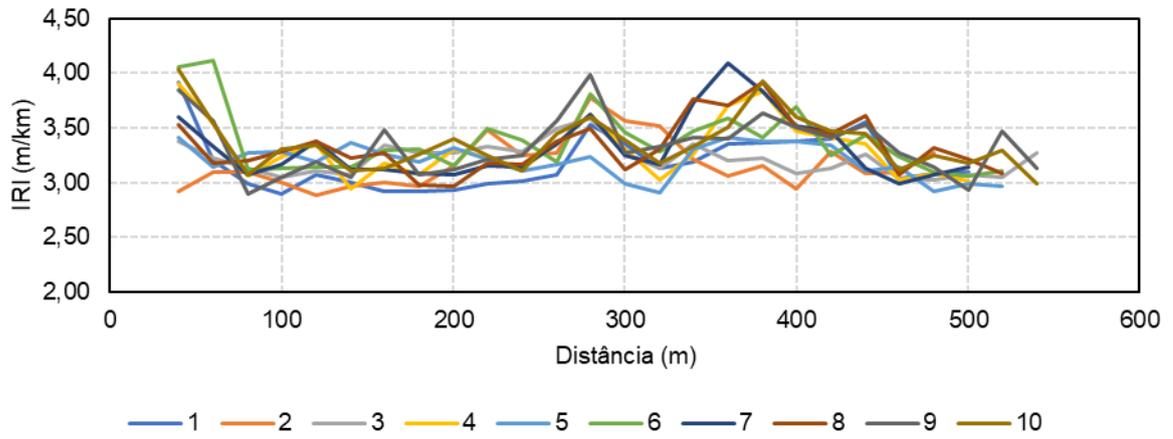
#### a) Perfilômetro inercial a laser



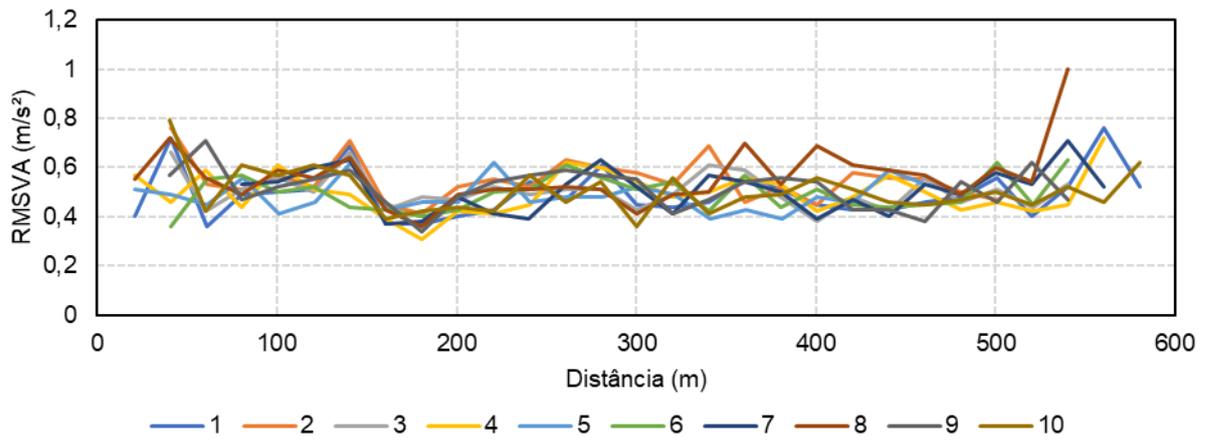
#### b) SmartIRI – S10



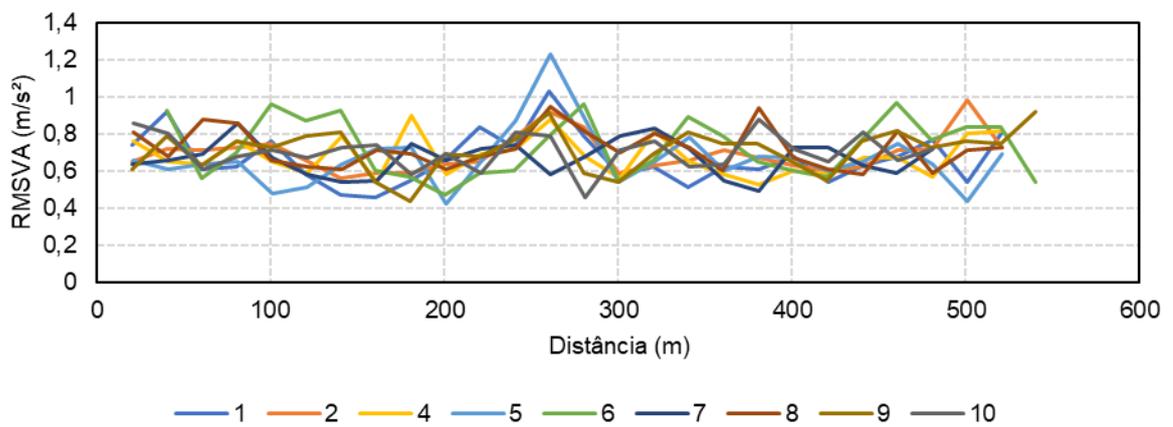
c) SmartITI – Civic



d) SensorLab – S10

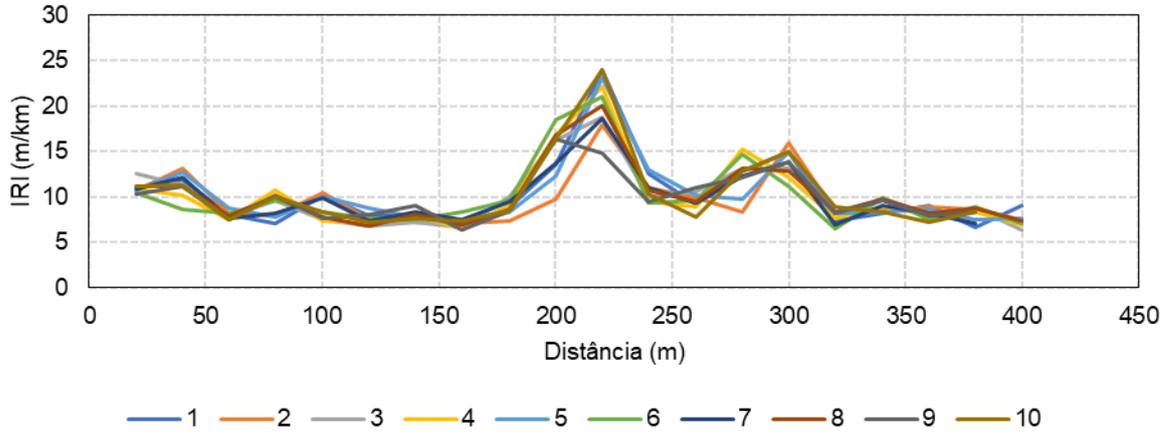


e) SensorLab – Civic

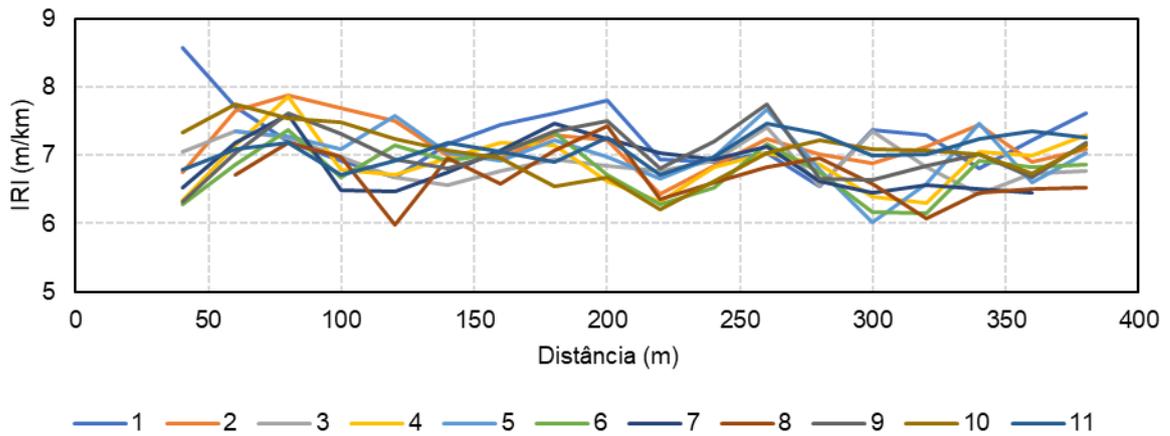


## 2. Trecho 2

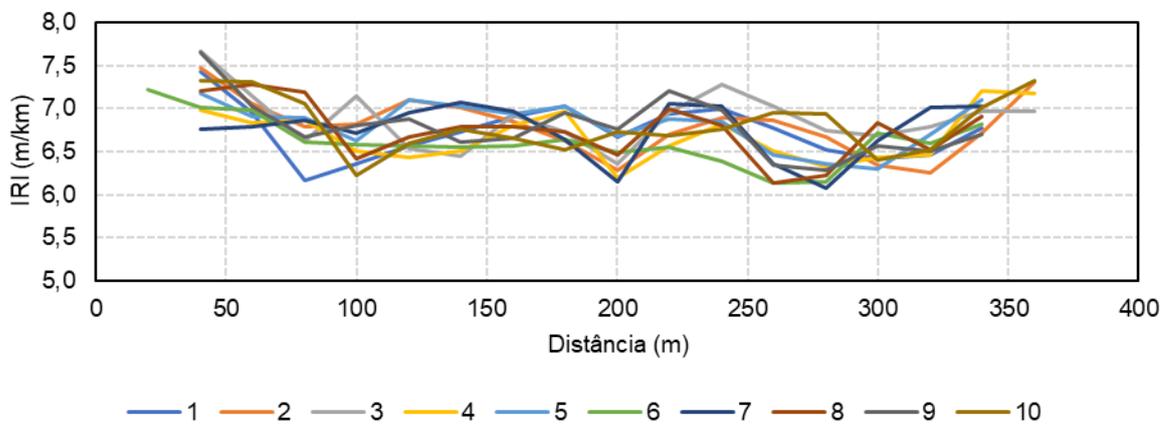
a) Perfilômetro Inercial a Laser



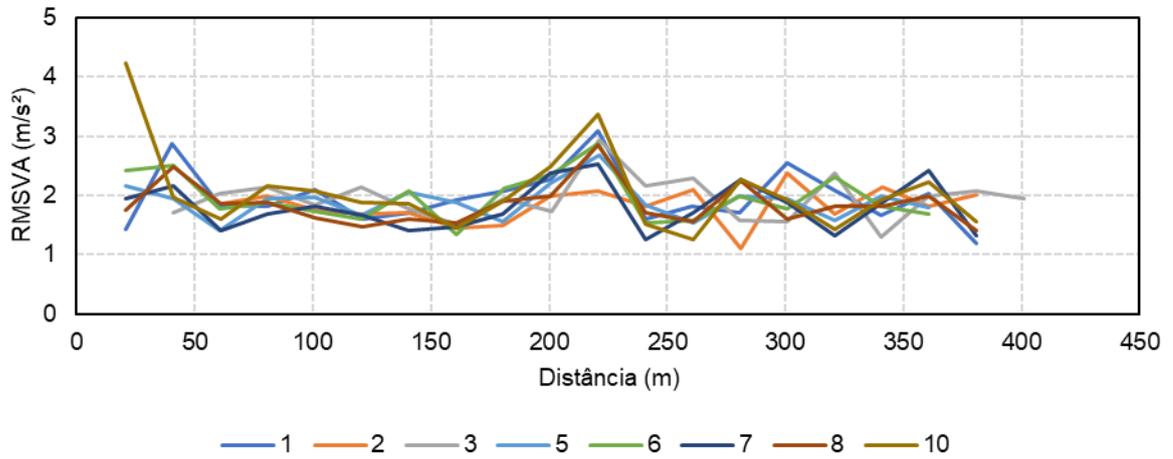
b) SmartIRI – S10



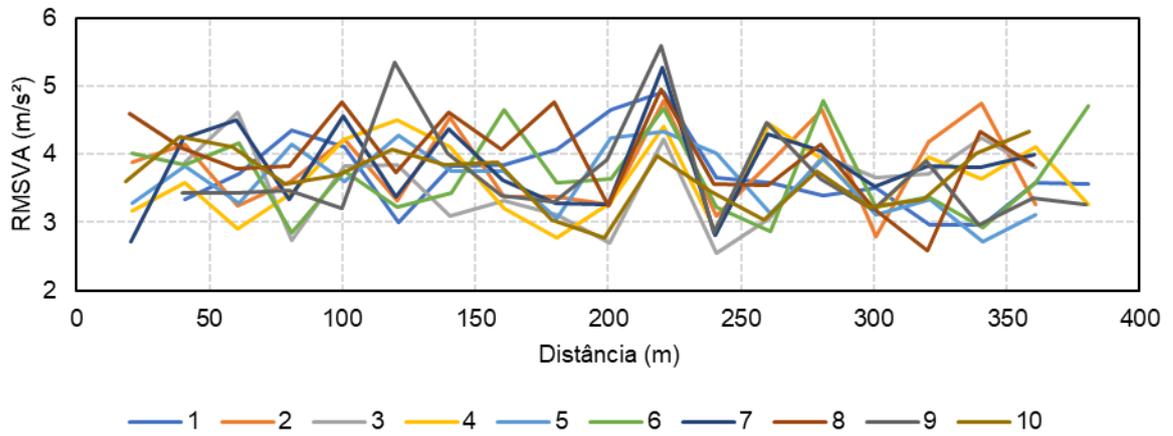
c) SmartIRI – Civic



d) SensorLab – S10

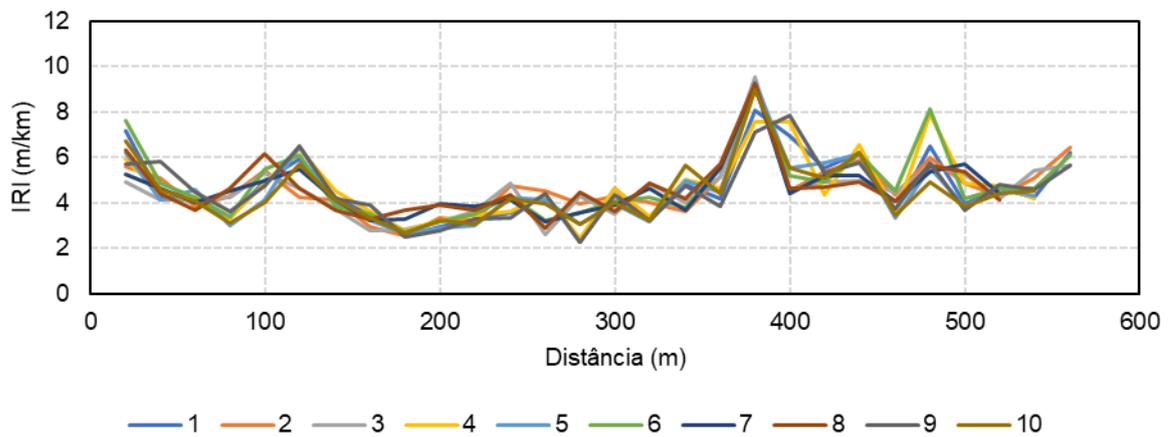


e) SensorLab – Civic

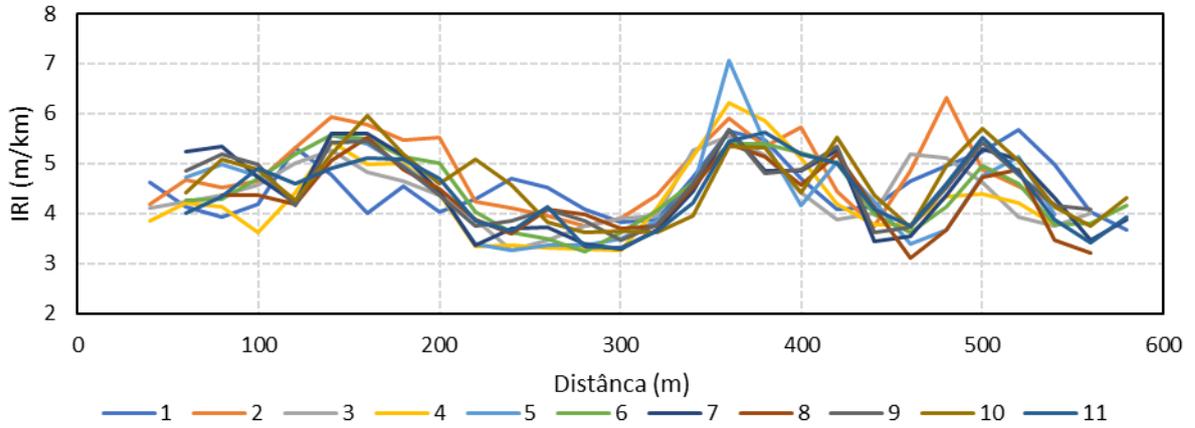


### 3. Trecho 3 – BR 287

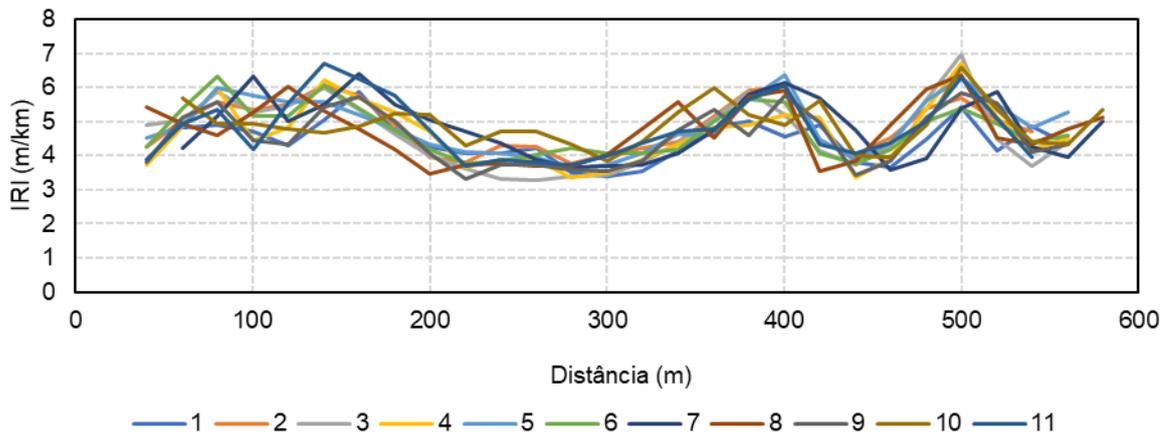
a. Perfilômetro Inercial a Laser



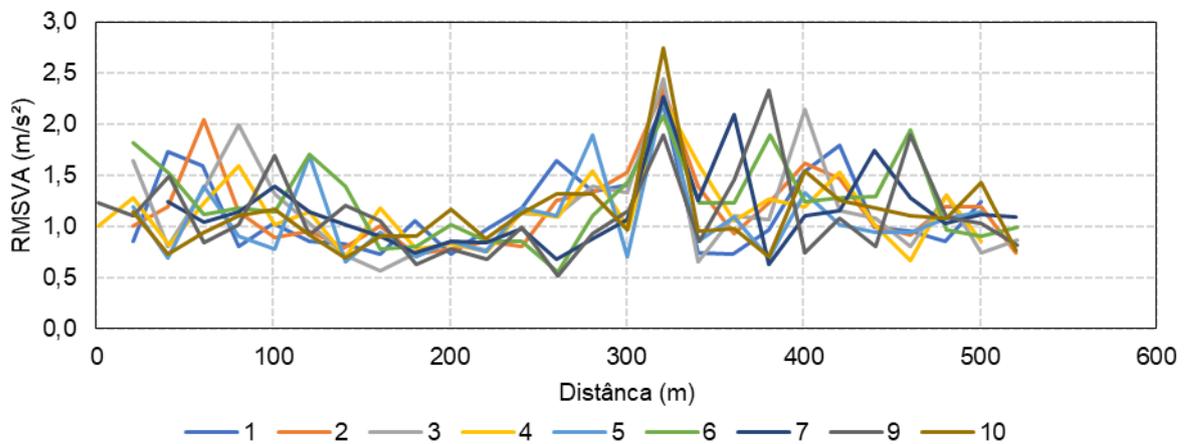
b. SmartIRI – S10



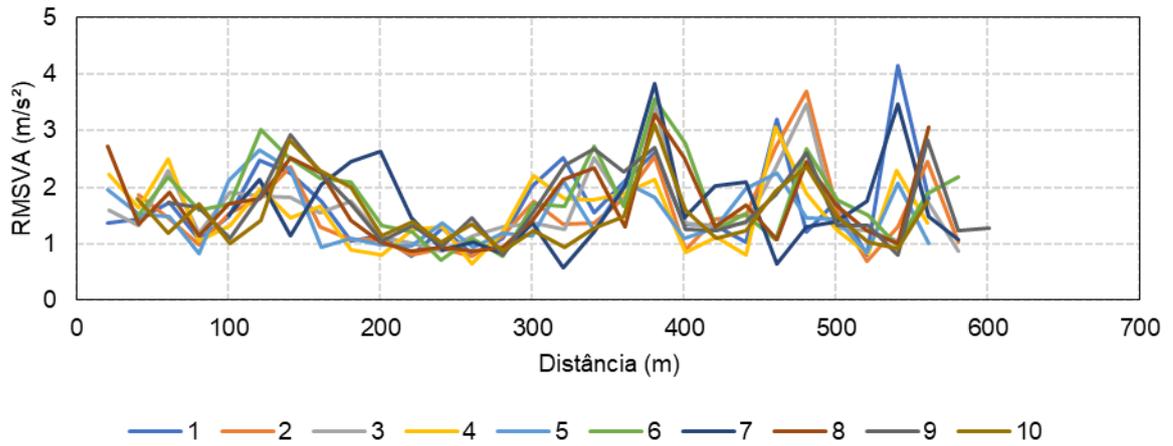
c. SmartIRI – Civic



d. SensorLab – S10

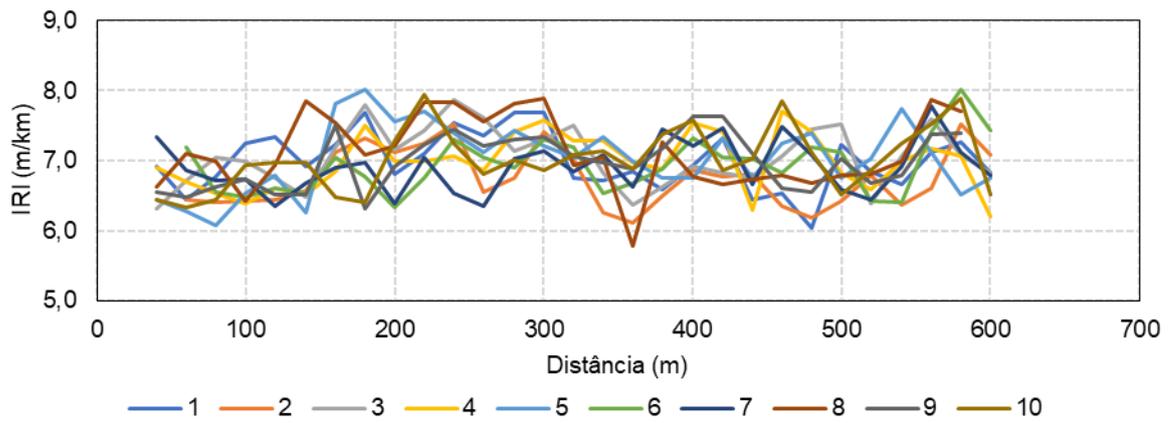


e. SensorLab – Civic

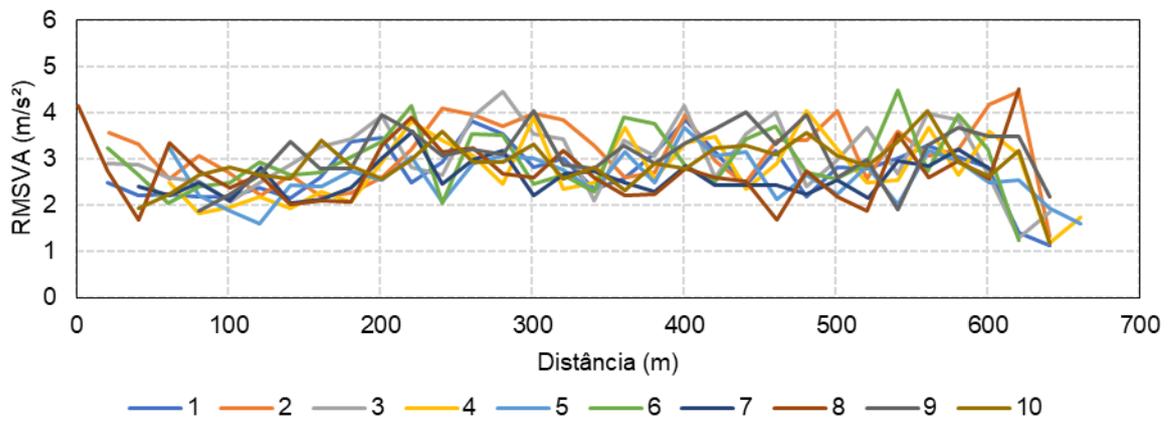


4. Rua Eurípedes Brasil Milano

a) SmartIRI – Civic

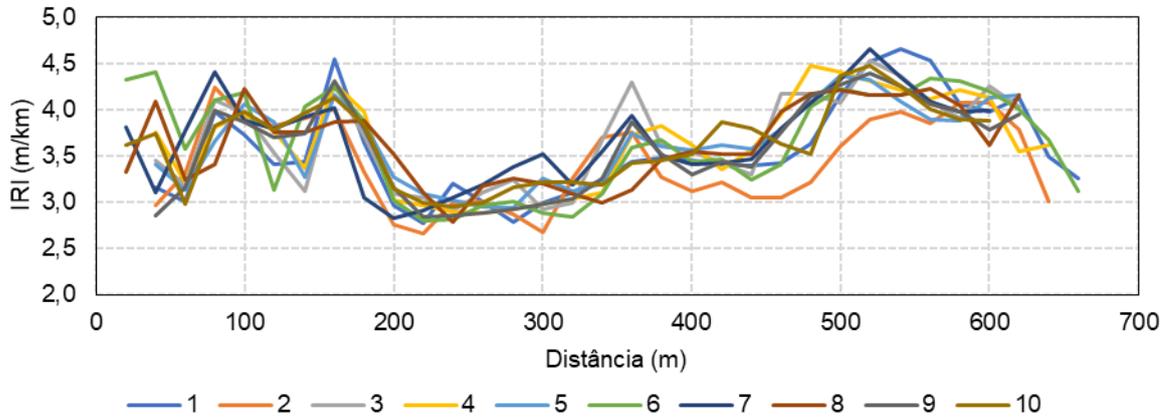


b) SensorLab – Civic

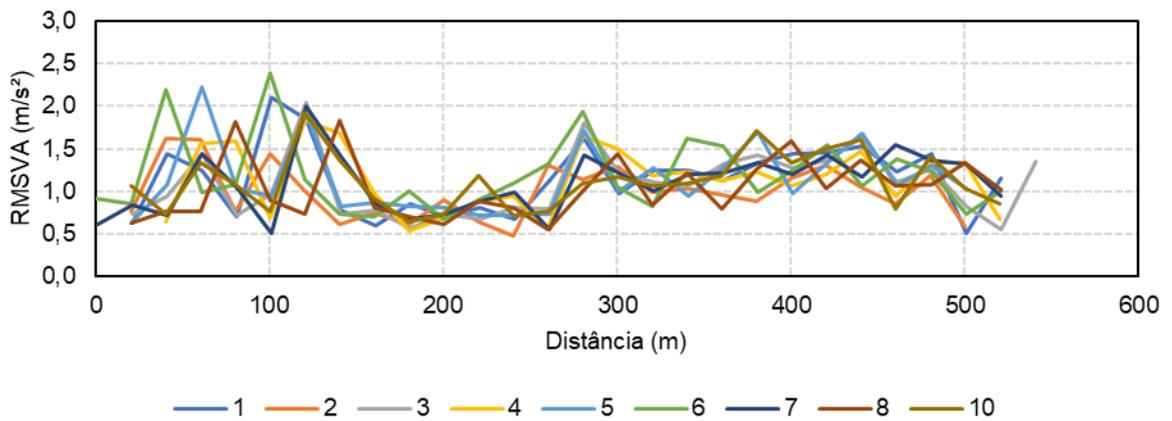


## 5. Rua Tiaraju

a) SmartIRI – Civic

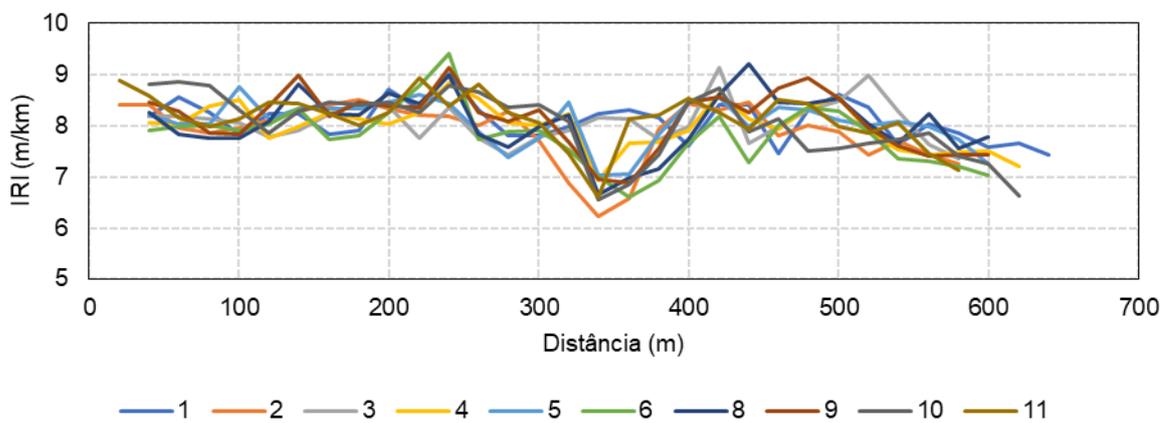


b) SensorLab – Civic



## 6. Rua Barros Cassal

a) SmartIRI – Civic



b) SensorLab – Civic

