



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

**SAULO PASSOS RAMOS**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DOS LEVANTAMENTOS DE BAIXO  
CUSTO DE PERFIL E IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTO  
COM O USO DE ACELERÔMETROS CONTROLADOS POR ARDUINO  
AUXILIADO POR BICICLETA**

**FORTALEZA  
2017**

SAULO PASSOS RAMOS

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DOS LEVANTAMENTOS DE BAIXO CUSTO  
DE PERFIL E IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTO COM O USO DE  
ACELERÔMETROS CONTROLADOS POR ARDUINO AUXILIADO POR BICICLETA**

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

Orientador: Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior.

FORTALEZA

2017

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

---

R146a Ramos, Saulo Passos.

Análise da viabilidade técnica dos levantamentos de baixo custo de perfil e irregularidade longitudinal de pavimento com o uso de acelerômetros controlados por arduino auxiliado por bicicleta / Saulo Passos Ramos. – 2017.

113 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Junior.

1. Perfil longitudinal. 2. irregularidade longitudinal. 3. acelerômetro. 4. bicicleta. I. Título.

CDD 388

---

**SAULO PASSOS RAMOS**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DOS LEVANTAMENTOS DE BAIXO CUSTO  
DE PERFIL E IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTO COM O USO DE  
ACELERÔMETROS CONTROLADOS POR ARDUINO AUXILIADO POR BICICLETA**

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

Orientador: Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior.

Aprovada em: 30/06/2017.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Carina Teixeira de Oliveira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

## AGRADECIMENTOS

A Deus (Digno de toda glória e louvor)!!

Professor Ernesto, por suas ideias, orientações e apoio.

À minha amada esposa Angélica (a Pretinha), pelo apoio nos momentos difíceis e compreensão nos momentos de ausência, por todos os beijos, abraços e por ser minha motivação e minha fonte de inspiração para chegar cada vez mais longe.

Rosiris (mainha), Ramos (painho), Raquel e Sofia (irmãs), por serem meu porto seguro, por todas as orações, por todas as palavras de apoio e delicadeza do tipo “vai desistir? Tá louco?”, por todas as vezes que confiaram em mim e me mostraram que eu sou capaz de vencer qualquer desafio.

Prof. Heber Oliveira e o cassaco Lucas Cavalcante, que estão entre as melhores aquisições dessa vida, por me ajudarem a desatar os nós desse Mestrado e por todas as horas maravilhosas de risada, fuxico, café e chocolate.

Agradeço de coração à minha equipe do Administrativo do Great (Marilu, Liliane, Danilo, Janaína e Jordão), por me incentivar e também acreditar que eu seria capaz de superar as dificuldades deste trabalho.

À Daianne Fernandes, Ana Tália e Erika Vanessa (Melhores aquisições do Mestrado), pela amizade e apoio ao longo desses muitos meses de Mestrado.

Agradeço também ao João Evangelista, Helmer Boris, Lilian, Junior Ribeiro, Sarah e todo o pessoal do grupo Renegados, Zaca, Annie, Clélia, Telma, Maria, Diego, Goreti e Eliane (pessoal do abraço e do apoio moral).

Rafael Wendell (levantamento topográfico), Lucas Cabral (desenvolvedor do sistema), mecânico Bonfim (pela usinagem e reparo do garfo escocês e os teste com acelerômetro), prof. Roberto Bezerra e seus bolsistas Victor Hugo e Anderson (auxílio nos testes de aferição do acelerômetro), aos professores do Departamento de Teleinformática Paulo Armando, George Thé, Jarbas, Cortez, Guilherme Barreto e, especialmente, ao bolsista Adahil Muniz (pelo auxílio e orientação na parte computacional do projeto).

Agradecimento especial à equipe do Laboratório de Redes de Computadores e Sistemas do IFCE de Aracati (LAR) por todo apoio dado na execução da pesquisa.

Agradeço também aos professores do PETRAN/DET/UFC, em especial à professora Suelly, por ser para o Heber o que ele é para mim.

“Senhor, eu não sou digno de que entreis em minha casa. Dizei uma só palavra e meu servo será curado” (Mateus 8, 8).

## RESUMO

A segurança dos usuários e o conforto ao rolamento são parâmetros funcionais que podem ser avaliados, entre outros critérios, pela irregularidade longitudinal. Dado que há uma forte relação entre o perfil e as irregularidades longitudinais de um pavimento, esta afinidade permite analisar a evolução daquele parâmetro. Para se executar o levantamento de perfil longitudinal de um pavimento e a avaliação de irregularidade longitudinal, de acordo com as normas atuais, pode-se citar, respectivamente, os métodos de nível e mira e do perfilômetro a *laser*. O primeiro demanda muito tempo e esforço físico dos operadores e o segundo, muitos recursos financeiros, por ser um equipamento que chega a custar quase R\$ 400.000,00. Dessa forma, torna-se razoável analisar a viabilidade do uso de novas tecnologias com o intuito de se reconstruir uma trajetória referente ao perfil longitudinal de um pavimento e avaliar e monitorar a evolução da irregularidade longitudinal de modo prático e econômico. Uma das maneiras para se obter o perfil e avaliar a irregularidade longitudinal, neste trabalho, foi pelo uso de sensores inerciais, como um acelerômetro. Este sensor controlado por um microcontrolador arduino fornece dados de aceleração, dos quais, após o processamento dos dados pelos softwares Matlab, Excel, Proval e Minitab, procurou-se verificar a qualidade e o comportamento dos sinais medidos com o objetivo de se avaliar a capacidade de o sensor reconstruir o perfil longitudinal e o potencial do equipamento de avaliar as irregularidades longitudinais de um pavimento. Na etapa de obtenção dos dados, foram utilizados um garfo escocês e um carrinho de trilho de ar, em laboratório, e uma bicicleta, com a qual foram realizadas várias passagens em um trecho experimental localizado no *Campus* do Pici da Universidade Federal do Ceará. Os dados de aceleração obtidos pelo acelerômetro foram processados através de filtros digitais de sinais e correlacionados com os valores do Índice Internacional de Irregularidade (*International Roughness Index – IRI*). Pela análise dos resultados, foi possível concluir que o equipamento não é eficiente para a obtenção do perfil longitudinal de um pavimento, devido à baixa velocidade da bicicleta. No entanto, o acelerômetro controlado por arduino apresentou elevado potencial para avaliar a irregularidade longitudinal de um pavimento, com 85% de resultados satisfatórios.

**Palavras-chave:** Perfil longitudinal, irregularidade longitudinal, acelerômetro, bicicleta.

## ABSTRACT

User safety and rolling comfort are functional parameters that can be evaluated, among other criteria, by roughness. Given that there is a strong relation between the profile and the longitudinal irregularities of a pavement, this affinity allows to analyze the evolution of that parameter. In order to carry out the survey of a longitudinal profile of a pavement and the evaluation of roughness, according to the current norms, we can mention, respectively, the level and sighting methods and the laser profilometer. The first one demands a lot of time and physical effort from the operators and the second, a lot of financial resources, since it is an equipment that costs almost R\$ 400,000,00. Thus, it is reasonable to analyze the feasibility of the use of new technologies in order to reconstruct a trajectory related to the longitudinal profile of a pavement and to evaluate and monitor the evolution of roughness in a practical and economical way. One of the ways to obtain the profile and to evaluate the roughness in this work was the use of inertial sensors, such as an accelerometer. This sensor controlled by an arduino microcontroller provides acceleration data, which, after processing the data using the Matlab, Excel, Proval and Minitab software, sought to verify the quality and behavior of the measured signals in order to evaluate the capacity Of the sensor to reconstruct the longitudinal profile and the potential of the equipment to evaluate the longitudinal irregularities of a pavement. In the data collection stage, a Scottish fork and an air rail trolley were used in the laboratory, and a bicycle, with which several passes were made in an experimental section located in the Pici Campus of the Federal University of Ceará. The acceleration data obtained by the accelerometer were processed through digital signal filters and correlated with the International Roughness Index (IRI) values. By the analysis of the results, it was possible to conclude that the equipment is not efficient to obtain the longitudinal profile of a pavement, due to the low speed of the bicycle. However, the accelerometer controlled by arduino had a high potential to evaluate the roughness of a pavement, with 85% of satisfactory results.

**Keywords:** Longitudinal profile, roughness, accelerometer, bicycle.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil Longitudinal e Transversal .....	21
Figura 2 - Variação da serventia com o tráfego ou com o tempo decorrido de utilização da via .....	23
Figura 3 - Diferença entre os níveis de irregularidade .....	24
Figura 4 – Interação entre os defeitos em pavimentos flexíveis.....	25
Figura 5 – Valor de IRI x Tipo de Pavimento .....	27
Figura 6 – Desenho esquemático do método nível e mira.....	32
Figura 7 – Exemplo de caderneta de anotação .....	33
Figura 8 – <i>Dipstick</i> (a) e Esquema de Funcionamento (b) .....	34
Figura 9 – Componentes do perfilômetro.....	35
Figura 10 – Perfis obtidos por três equipamentos diferentes.....	37
Figura 11 – Desenho esquemático do <i>BPR Roughmeter</i> .....	38
Figura 12 - <i>BPR Rouhgrometer</i> .....	39
Figura 13 – Relação Conveniência e Precisão dos Equipamentos .....	40
Figura 14 – Arduino – Plataforma UNO .....	41
Figura 15 - Acelerômetro e as indicações dos eixos .....	42
Figura 16 - Efeito da Transformada Rápida de Fourier .....	44
Figura 17 – Efeito dos Filtros Digitais .....	45
Figura 18 - Trajetória do objeto: Real (azul) e Estimada por Kalman (verde).....	46
Figura 19 – Esquema da montagem do protótipo.....	50
Figura 20 - O Protótipo.....	50
Figura 21 – A Bicicleta.....	51
Figura 22 - Componentes na Bicicleta. ....	52
Figura 23 – Localização do levantamento topográfico .....	53
Figura 24 - Marcação dos pontos na superfície do pavimento .....	55
Figura 25 – Levantamento realizado pelo método nível e mira .....	55
Figura 26 – Superfície do Pavimento e o tipo de veículo que trafega.....	56
Figura 27 - Nível Digital DL-201 .....	57
Figura 28 – Altura máxima da mira de 5,0m.....	58
Figura 29 – Três prolongamentos da mira.....	58
Figura 30 – Garfo Escocês.....	59
Figura 31 – Adaptador do Acelerômetro.....	59

Figura 32 - Acelerômetro no Garfo Escocês .....	60
Figura 33 – Bancada e seus equipamentos .....	60
Figura 34 - Osciloscópio e conversor de dados .....	61
Figura 35– Equipamentos de medição de frequência .....	61
Figura 36 - Diferentes diâmetros do garfo escocês .....	62
Figura 37 – Acelerômetro no torno mecânico .....	63
Figura 38 – Trilho de Ar.....	64
Figura 39 – Acelerômetro do Trilho de Ar.....	64
Figura 40 – Nivelamento do Sensor .....	66
Figura 41 – Interface do Matlab .....	67
Figura 42 – Esquema do Processamento de dados .....	68
Figura 43 – Bloco de Processamento de Dados .....	68
Figura 44 – Segmentação dos dados de aceleração vertical.....	70
Figura 45 – Interface do Software ProVal.....	70
Figura 46 – Interface do software Minitab .....	71
Figura 47 – Perfil Longitudinal do Trecho Levantado (320m - 641 pontos) .....	72
Figura 48 – Trecho experimental - <i>Campus</i> do Pici (UFC) .....	72
Figura 49 - Patologias do trecho experimental .....	73
Figura 50 – Gráfico do IRI do trecho experimental .....	74
Figura 51 – Dados de aceleração na Bicicleta a 05Km/h filtrado por filtro de Kalman (sentido Ida) .....	76
Figura 52 – Dados de aceleração na Bicicleta a 10Km/h filtrado por filtro de Kalman (sentido Volta).....	76
Figura 53 – Dados de aceleração na Bicicleta a 10Km/h filtrado por filtro de Kalman (sentido Ida) .....	77
Figura 54 – Dados de aceleração na Bicicleta a 15Km/h filtrado por filtro de Kalman (sentido Ida) .....	77
Figura 55 – Dados de aceleração na Bicicleta a 15Km/h filtrado por filtro de Kalman (sentido Volta).....	78
Figura 56 – Dados de aceleração na Bicicleta a 20Km/h filtrado por filtro de Kalman (sentido Volta).....	78
Figura 57 – Dados de aceleração - Bicicleta a 20Km/h filtrado por filtro de Kalman (sentido Ida) .....	79
Figura 58 – Dados de aceleração na Garfo Escocês filtrados por filtro de Kalman .....	79

Figura 59 – Dados de aceleração no Trilho de Ar filtrados por filtro de Kalman.....	80
Figura 60 – Comparativo de comportamento dos gráficos (filtro de Kalman) .....	81
Figura 61 – Dados de aceleração na Bicicleta a 5Km/h filtrado por média móvel (sentido Ida).....	82
Figura 62 – Dados de aceleração na Bicicleta a 5Km/h filtrado por média móvel (sentido Volta).....	82
Figura 63 – Dados de aceleração na Bicicleta a 10Km/h filtrado por média móvel (sentido Ida) .....	83
Figura 64 – Dados de aceleração na Bicicleta a 10Km/h filtrado por média móvel (sentido Volta).....	83
Figura 65 – Dados de aceleração na Bicicleta a 15Km/h filtrado por média móvel (sentido Ida) .....	84
Figura 66 – Dados de aceleração na Bicicleta a 15Km/h filtrado por média móvel (sentido Volta).....	84
Figura 67 – Dados de aceleração na Bicicleta a 20Km/h filtrado por média móvel (sentido Ida) .....	85
Figura 68 – Dados de aceleração na Bicicleta a 20Km/h filtrado por média móvel (sentido Volta).....	85
Figura 69 – Comparativo de comportamento dos gráficos (filtro média móvel) .....	86
Figura 70 - Diferença de Amplitude entre os sinais de aceleração de todas as velocidades ....	87
Figura 71 - Classificação do Acelerômetro controlado por arduino proposto .....	93
Figura 72 – Esquema da montagem do protótipo (1 <sup>a</sup> versão).....	102
Figura 73 – O Protótipo (1 <sup>a</sup> Versão).....	107
Figura 74 - Sequência para a criação de um arquivo de dados.....	108
Figura 75 – Conteúdo do arquivo gerado pelo arduino .....	109

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Classificação da Textura de um Pavimento.....	24
Tabela 2 – Condição de Superfície do Pavimento por DNIT (2006) .....	26
Tabela 3 – Condição de Superfície do Pavimento.....	27
Tabela 4 – Condições de Superfície do Pavimento .....	28
Tabela 5 – Condições de Superfície do Pavimento .....	28
Tabela 6 – Ensaios com a bicicleta no trecho experimental.....	65
Tabela 7 – Resultados estatísticos dos dados de aceleração vertical obtidos pela bicicleta a cada 5m .....	92
Tabela 8 – Resumo dos resultados estatísticos dos ensaios com a bicicleta .....	92
Tabela 9 - Comparativo entre o equipamento proposto e métodos de outras classes de equipamentos medidores de irregularidade longitudinal.....	94

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Conversor Analógico-Digital
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
FFT	<i>Fourrier Fast Transform</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HDM-4	<i>Highway Development and Maintenance</i>
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
IRI	<i>International Roughness Index</i>
QI	Quociente de Irregularidade
RTRRMS	Response-Type Road Roughness Measuring System
UFC	Universidade Federal do Ceará
VSA	Valor de Serventia Atual

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização.....</b>	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>17</b>
<b>1.3</b>	<b>Questões de pesquisa .....</b>	<b>18</b>
<b>1.4</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>18</b>
<b>1.4.1</b>	<b>Geral .....</b>	<b>18</b>
<b>1.4.2</b>	<b>Específicos .....</b>	<b>18</b>
<b>1.5</b>	<b>Contribuição do trabalho .....</b>	<b>19</b>
<b>1.6</b>	<b>Estrutura do trabalho.....</b>	<b>19</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1</b>	<b>Perfil longitudinal do pavimento .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2</b>	<b>Parâmetros para a avaliação funcional de pavimentos .....</b>	<b>22</b>
<b>2.3</b>	<b>Irregularidade longitudinal .....</b>	<b>23</b>
<b>2.4</b>	<b>Classes de equipamentos utilizados na medição da irregularidade longitudinal..</b>	<b>28</b>
<b>2.4.1</b>	<b><i>Classes I – alta precisão de medição do perfil .....</i></b>	<b>29</b>
<b>2.4.2</b>	<b><i>Classes II – medição sem contato com a superfície.....</i></b>	<b>30</b>
<b>2.4.3</b>	<b><i>Classes III – equipamentos tipo-resposta.....</i></b>	<b>30</b>
<b>2.4.4</b>	<b><i>Classes IV: avaliação subjetiva .....</i></b>	<b>31</b>
<b>2.5</b>	<b>Equipamentos utilizados na medição da irregularidade longitudinal .....</b>	<b>31</b>
<b>2.5.1</b>	<b><i>Nível e mira (classe I) .....</i></b>	<b>31</b>
<b>2.5.2</b>	<b><i>Dipstick (classe I).....</i></b>	<b>33</b>
<b>2.5.3</b>	<b><i>Perfilômetro inercial (classe II) .....</i></b>	<b>34</b>
<b>2.5.4</b>	<b><i>BPR roughmeter (classe III) .....</i></b>	<b>37</b>
<b>2.6</b>	<b>NAVEGAÇÃO INERCIAL .....</b>	<b>40</b>
<b>2.6.1</b>	<b><i>Plataforma arduino e acelerômetro .....</i></b>	<b>41</b>
<b>2.7</b>	<b>PROCESSAMENTO DE SINAIS .....</b>	<b>43</b>
<b>2.7.1</b>	<b><i>Filtros digitais .....</i></b>	<b>43</b>
<b>2.7.2</b>	<b><i>Filtro média móvel .....</i></b>	<b>45</b>
<b>2.7.3</b>	<b><i>Filtro de Kalman .....</i></b>	<b>45</b>
<b>2.8</b>	<b>Estatística – teste de hipóteses .....</b>	<b>46</b>

<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>48</b>
<b>3.1</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>48</b>
<b>3.2</b>	<b>Montagem do protótipo.....</b>	<b>49</b>
<b>3.3</b>	<b>Uso de bicicleta.....</b>	<b>51</b>
<b>3.4</b>	<b>Dados do levantamento do trecho .....</b>	<b>53</b>
<b>3.5</b>	<b>O levantamento do perfil do trecho experimental .....</b>	<b>54</b>
<b>3.6</b>	<b>Sobre os ensaios de validação .....</b>	<b>58</b>
<b>3.6.1</b>	<b><i>No garfo escocês .....</i></b>	<b>58</b>
<b>3.6.2</b>	<b><i>No carrinho do trilho de ar .....</i></b>	<b>64</b>
<b>3.6.3</b>	<b><i>Na bicicleta.....</i></b>	<b>65</b>
<b>3.7</b>	<b>Processamento dos dados .....</b>	<b>66</b>
<b>4.</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>72</b>
<b>4.1</b>	<b>Representação da imagem do perfil levantado com nível e mira .....</b>	<b>72</b>
<b>4.2</b>	<b>Sobre o trecho analisado .....</b>	<b>72</b>
<b>4.3</b>	<b>Análise dos resultados .....</b>	<b>74</b>
<b>4.4</b>	<b>Classificação do equipamento proposto.....</b>	<b>93</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>93</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>97</b>
	<b>APÊNDICE A – DESAFIOS DA MONTAGEM DO EQUIPAMENTO .....</b>	<b>101</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

Neste capítulo introdutório, são apresentados a contextualização, justificativa e os problemas que motivaram esta pesquisa. Além desses, constam os objetivos, a estrutura e as contribuições do trabalho.

### **1.1 Contextualização**

O transporte tem desempenhado um papel fundamental na busca pelo desenvolvimento de uma sociedade, pois permite uma rápida mobilidade de pessoas, bens e serviços, uma maior dispersão geográfica de atividades produtivas. Por outro lado, um sistema de transporte falho pode comprometer o setor agrícola, dificultar a integração nacional, retardar o crescimento econômico de uma nação e prejudicar a segurança nacional.

De acordo com a Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2017), em 2015, 75,8% dos passageiros utilizou o modal rodoviário. Os outros 24,2% ficaram distribuídos entre os modais aerooviário e ferroviário.

Em 2015, havia mais de 93 milhões de veículos emplacados no Brasil. Esses veículos podem trafegar pelos 1,720 milhões de quilômetros de rodovias da malha viária. Dessa malha, aproximadamente 12% é pavimentada, 9% está em fase de planejamento e 79% é não pavimentada.

Segundo o CNT (2017), em 2015, dos 103 mil quilômetros de rodovias avaliados da malha viária brasileira, 51,8% apresenta condições de superfície entre regular, ruim e péssima. Isso significa que mais da metade das rodovias do país estão carentes de algum tipo manutenção ou intervenção e essa inadequação das condições do pavimento gera custos adicionais de até 91,5% para o transportador de cargas brasileiro. A solução para cada trecho será definida a partir de uma avaliação funcional do pavimento.

A avaliação funcional consiste em caracterizar um pavimento quanto aos parâmetros de coeficiente de atrito, macrotextura e irregularidade longitudinal, que é caracterizada como o somatório dos desvios da superfície de um pavimento em relação a um plano de referência. A irregularidade longitudinal de um pavimento afeta a qualidade de rolamento do veículo com consequente desconforto aos usuários. Além disso, ela aumenta os custos de manutenção e o consumo de combustível e de pneus. Neste contexto, proporcionar segurança e eficiência operacional nas rodovias também significa economia nos custos de transportes.

Há uma forte relação entre o perfil longitudinal de um pavimento e a sua irregularidade longitudinal e esta relação permite analisar alguns dos parâmetros funcionais do pavimento, tais como a segurança dos usuários e o conforto ao rolamento.

DNER (1994b) preconiza uma metodologia para se calcular a irregularidade através do levantamento do perfil longitudinal do pavimento obtido pelo uso de nível e mira. De acordo com esse método, os trechos cuja irregularidade longitudinal a ser avaliada deve ter, no mínimo, 320m com o estaqueamento principal de 5m e o estaqueamento intermediário de 0,5m. Isso totaliza, pelo menos, 1282 pontos a serem levantados nas duas trilhas de roda.

Dessa forma, o uso do método nível e mira para fins de avaliação de irregularidade longitudinal torna-se uma atividade muito laboriosa e demanda bastante tempo de operação devido à grande quantidade de pontos a serem levantados. O perfilômetro inercial, equipamento de medição de irregularidade longitudinal, tem custo que pode chegar a quase R\$ 400.000,00. Isso inviabiliza o levantamento de irregularidade em nível de rede por esses métodos.

Devido aos fatores supracitados e a constate insuficiência de recursos destinados à manutenção e ao monitoramento das rodovias públicas, os gestores dos pavimentos não fazem as medições periódicas ou trabalham com dados desatualizados para orientar as tomadas de decisão sobre qual trecho da rede deve ser priorizado para receber as intervenções de manutenção e reabilitação.

Assim, é razoável fazer uma análise da viabilidade de outras alternativas para realizar uma avaliação da superfície dos pavimentos. Uma delas é o uso de sensores de aceleração (acelerômetros). Nesse contexto, será analisado o potencial de um acelerômetro para reconstruir o perfil longitudinal de um pavimento através da estimativa da trajetória vertical percorrida por um veículo. Além disso, analisar o potencial desses sensores para avaliar a irregularidade longitudinal da superfície de um pavimento a partir de dados de aceleração vertical. Não será calculado o IRI a partir dos dados obtidos por acelerômetros na corrente pesquisa.

## 1.2 Justificativa

Para que o Brasil apresente melhorias na qualidade da sua infraestrutura, são necessários amplos e contínuos investimentos. Assim, é essencial que o país disponha de instrumentos de avaliação que permitam o monitoramento constante das condições da infraestrutura existente para que se tenha uma previsão do que e onde fazer as intervenções

necessárias. Essa coleta de dados permite, inclusive, melhorar a previsão de desempenho de um pavimento ao longo do tempo.

Diante da necessidade de se buscar alternativas técnicas mais econômicas com para se viabilizar o levantamento de dados sobre as irregularidades das superfícies nos pavimentos e a obtenção de procedimentos técnicos menos trabalhosos e mais acessíveis para a determinação do perfil longitudinal, procurou-se, pelo uso de acelerômetro transportados por uma bicicleta, verificar o comportamento e a qualidade dos sinais medidos por esses sensores e de que forma sua aplicação seria tecnicamente viável.

### **1.3 Questões de Pesquisa**

Diante das considerações anteriores, surgem as seguintes questões:

- a) De que forma é possível obter as medidas da irregularidade e do perfil longitudinal dos pavimentos, considerando a necessidade da acurácia e do alto rendimento por um baixo custo?
- b) Como obter dados de aceleração vertical pelo uso de acelerômetro embarcado em uma bicicleta?
- c) É possível obter dados de perfil longitudinal pelo uso de um acelerômetro controlado por um arduino?
- d) É possível estimar a irregularidade longitudinal pelo uso de um acelerômetro controlado por um arduino?
- e) Como os dados de perfil e irregularidade longitudinal serão validados?

### **1.4 Objetivos**

A seguir, os objetivos geral e específicos deste trabalho.

#### ***1.4.1 Geral***

Analisar a viabilidade técnica dos levantamentos do perfil e da irregularidade longitudinal do pavimento com o uso de sensores iniciais (acelerômetro) controlado por arduino.

#### ***1.4.2 Específicos***

- a) Desenvolver um equipamento capaz de obter a aceleração vertical provocada pelas irregularidades da superfície do pavimento em uma bicicleta;

- b) Processar e analisar os dados de aceleração vertical visando obter uma correlação com o perfil longitudinal do pavimento obtido com o levantamento realizado pelo método nível e mira;
- c) Analisar o potencial de uso dos acelerômetros controlado por arduino para estimar a irregularidade longitudinal dos pavimentos através dos dados de aceleração vertical;
- d) Calcular o IRI baseado nos dados do levantamento realizado pelo método Nível e mira e correlacionar com os dados de aceleração vertical obtidos pelo acelerômetro.

## 1.5 Contribuição do Trabalho

Esse trabalho tem como principais contribuições o desenvolvimento de um equipamento de baixo custo e fácil manuseio capaz de obter dados de aceleração vertical de uma bicicleta, considerada um veículo de baixo custo, com um tempo de operação, relativamente, curto. Esses dados, cuja análise se dá de modo visual e estatístico, poderão ser utilizados pelos gestores de rodovias para classificar as condições da superfície dos pavimentos e priorizar os trechos que necessitam de alguma manutenção.

## 1.6 Estrutura do Trabalho

Além desse Capítulo introdutório, esse trabalho é composto pelo Capítulo 2, no qual constam as definições levantadas em artigos, teses, dissertações e documentos de agências reguladoras sobre perfil e irregularidade longitudinal de pavimento, parâmetros para avaliação funcional de pavimentos, classes de equipamentos medidores de perfil, sistema de navegação inercial, filtros digitais e testes estatísticos de hipóteses.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos, além dos desafios encontrados para o desenvolvimento do equipamento proposto e do tratamento dos dados. Entre os materiais utilizados estão um garfo escocês, um carrinho de trilho de ar, uma bicicleta, um microcontrolador arduino e um acelerômetro. Quanto aos métodos, pode-se citar os ensaios realizados em laboratórios, o levantamento de perfil realizado no trecho experimental e os filtros de Kalman e média móvel utilizados no processamento dos dados de aceleração vertical.

O Capítulo 4 apresenta o estudo de caso aplicado em trecho experimental no *Campus do Pici* da Universidade Federal do Ceará, os resultados dos processamentos dos dados do acelerômetro no garfo escocês, no carrinho de trilho de ar e na bicicleta quanto à

reprodução da trajetória e do comportamento do sinal de aceleração em relação à irregularidade longitudinal. O Capítulo 5 apresenta as conclusões e as proposições para trabalhos futuros.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

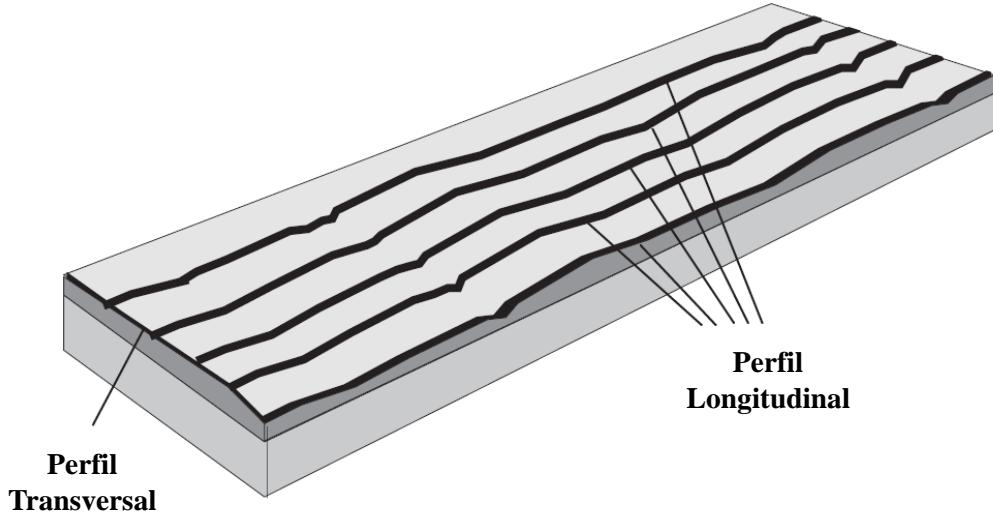
Nesse referencial teórico, apresentam-se os principais aspectos relacionados ao perfil, à irregularidade longitudinal de pavimento, aos métodos e equipamentos medidores de perfil e irregularidade longitudinal e ao processamento de sinais. Para isso, foram consultados livros, normas técnicas, artigos, teses e dissertações relacionadas ao tema na busca de fundamentar a teoria e a prática desse trabalho.

### **2.1 Perfil longitudinal do Pavimento**

Para Pimenta (2004), o perfil longitudinal, ou simplesmente perfil, é o corte do terreno e da estrada projetada por uma superfície vertical que contém o eixo da planta. Deve ser escolhido de tal forma que permita aos veículos que percorrerem a estrada uma razoável uniformidade de operação.

Segundo Karamihas e Sayers (1998), a linha do perfil transversal está relacionada à superelevação da pista e o perfil longitudinal se refere ao projeto do greide (traçado com as alturas dos diversos pontos do seu eixo), irregularidade e textura da rodovia. A Figura 1 apresenta os referidos perfis.

Figura 1 – Perfil Longitudinal e Transversal



Fonte: Adaptado de Karamihas e Sayers (1998)

Ainda conforme Karamihas e Sayers (1998), o perfil longitudinal de um pavimento pode ser mensurado ao longo de uma linha imaginária contínua na superfície,

sendo um perfil para cada uma das linhas, conforme a Figura 1. Frequentemente, os perfis longitudinais são medidos ao longo das duas trilhas de roda de cada faixa da via.

Para o autor supracitado, qualquer uma dessas linhas longitudinais da rodovia pode ser considerada um perfil verdadeiro. Os requisitos para a medição desse perfil dependem do que se pretende fazer com essa informação. Se o objetivo for obter o greide de um pavimento, por exemplo, o perfil pode ser obtido através de estacas a cada 20m ao longo de quilômetros. No entanto, se a aplicação for uma análise computacional da irregularidade longitudinal baseada no perfil, como é o caso do presente trabalho, essa análise requer pontos obtidos na ordem de centésimos de milímetros.

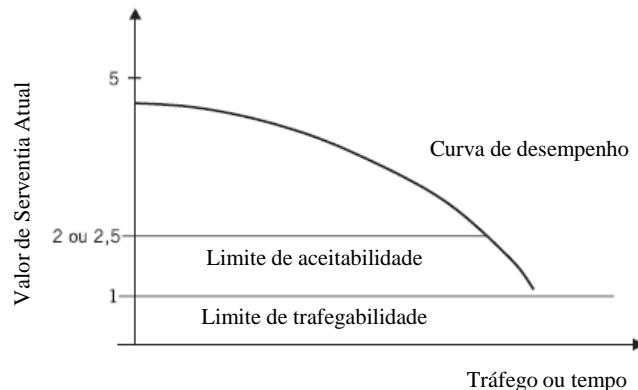
Para Perera *et al.* (2008), o perfil longitudinal correspondente às trilhas de roda de um pavimento pode ser utilizado para avaliar a irregularidade longitudinal do pavimento. As alterações no referido perfil ao longo do tempo é um indicador importante do desempenho do pavimento, pois está diretamente relacionado à evolução das irregularidades longitudinais.

## 2.2 Parâmetros para a Avaliação Funcional de Pavimentos

O objetivo do pavimento é garantir a trafegabilidade em qualquer época do ano e em quaisquer condições climáticas. A partir dessa premissa, Carey e Irick (1960) desenvolveram um método de avaliação funcional do pavimento baseado na serventia de um dado trecho de pavimento.

Carey e Irick (1960) definem serventia com a capacidade de um pavimento em servir ao seu usuário. O Valor de Serventia Atual (VSA) é uma atribuição numérica compreendida em uma escala de 0 (péssimo) a 5 (excelente), dada pela média das notas dos avaliadores para o conforto ao rolamento de um veículo. Esse valor de serventia tende, naturalmente, a reduzir devido ao efeito do tráfego e das intempéries. A Figura 2 apresenta o comportamento da serventia em função do tempo e os limites de aceitabilidade de trafegabilidade.

Figura 2 - Variação da serventia com o tráfego ou com o tempo decorrido de utilização da via



Fonte: Bernucci *et al.* (2007)

Há, ainda, o conceito de desempenho do pavimento, que é a variação da serventia ao longo do tempo. Para Bernucci *et al.* (2007), o desempenho adequado do pavimento e do subleito (terreno natural sobre o qual se constrói o pavimento) relaciona-se à capacidade de suporte e à durabilidade compatível com o padrão de obra e o tipo de tráfego. Além desses fatores, o desempenho também está relacionado ao conforto ao rolamento, à segurança dos usuários e aos custos operacionais dos veículos.

Assim, Bernucci *et al.* (2007) afirmam que a avaliação funcional é representada pela serventia e pelas irregularidades da superfície de um pavimento, que se relacionam ao conforto ao rolamento. Para Ramalho (2012), a avaliação funcional consiste na caracterização de parâmetros fundamentais, como coeficiente de atrito, profundidade média da macrotextura e a irregularidade longitudinal da superfície do pavimento.

### 2.3 Irregularidade Longitudinal

Por definição do Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNER, 1994a), a irregularidade longitudinal de um pavimento é o desvio da superfície da rodovia em relação a um plano de referência. Esses desvios afetam a dinâmica dos veículos, a qualidade do rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via.

Barella (2008) define irregularidade longitudinal de um pavimento como sendo o conjunto dos desvios indesejáveis de sua superfície, que atrapalha o rolamento rápido e suave dos veículos, gera insegurança e onera seus usuários, além de acelerar a degradação do pavimento.

Segundo Dynatest (2015), a irregularidade longitudinal é o parâmetro do pavimento que mais interfere nos custos operacionais dos veículos. Dessa forma, esse

parâmetro se torna fundamental no processo de planejamento e de projetos de manutenção de uma rede viária.

A Figura 3 apresenta a diferença entre os diferentes níveis de irregularidade.

Figura 3 - Diferença entre os níveis de irregularidade



Fonte: Adaptado de Douangphachanh (2014)

Os números indicam, respectivamente

- 1 → Superfície plana;
- 2 → Microtextura;
- 3 → Macrotextura;
- 4 → Megatextura;
- 5 → Irregularidade;
- 6 → Perfil longitudinal.

De acordo com Bernucci *et al.* (2007), a diferença entre esses níveis de textura é dependente do tamanho do comprimento de onda das respectivas irregularidades. O comprimento de onda corresponde à distância entre os picos ou vales das irregularidades. A Tabela 1 apresenta essas diferenças.

Tabela 1 – Classificação da Textura de um Pavimento

Classificação da Textura	Faixa de Comprimento de Onda
Microtextura	$\lambda < 0,5\text{mm}$
Macrotextura	$0,5\text{mm} \leq \lambda < 50\text{mm}$
Megatextura	$50\text{mm} \leq \lambda < 500\text{mm}$
Irregularidade	$0,5\text{m} \leq \lambda < 50\text{m}$

Fonte: Bernucci *et al.* (2007)

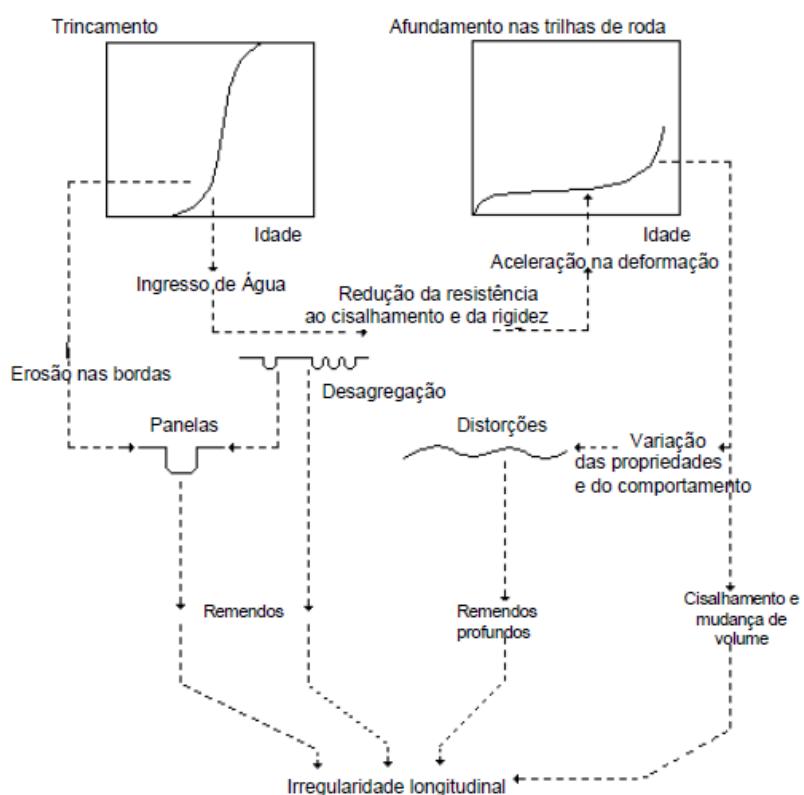
A proposta de um pavimento funcional é um rolamento rápido, seguro e econômico de modo confortável. Dessa forma, as irregularidades longitudinais comprometem todas essas funcionalidades.

De acordo com DNIT (2006), em pavimentos rodoviários, esses desvios de superfície, além de afetar a dinâmica dos veículos e o conforto ao rolamento, como dito anteriormente, podem apresentar como consequências o aumento de combustível, redução da capacidade de frenagem devido à possibilidade de acúmulo de água na pista, desgaste irregular e prematuro dos pneus. Esse aumento do custo operacional veicular pode chegar a 91,5% quando a superfície do pavimento estiver em péssimas condições.

É ainda importante para o processo de planejamento e de projetos da manutenção avaliar periódica e permanentemente a condição de superfície do pavimento. Uma das melhores maneiras é pela análise das irregularidades longitudinais do pavimento, pois, conforme DNIT (2006), há uma interação entre os defeitos dos pavimentos. Essa relação entre as patologias é apresentada na Figura 4.

De acordo com a Figura 4, as irregularidades superficiais do pavimento são os sinais mais facilmente perceptíveis de que algo na estrutura do pavimento não está em conformidade com as normas. Um exemplo disso é que, quando há trincamentos, ocorre a infiltração de água nas camadas de base, o que reduz a rigidez e a resistência ao cisalhamento do pavimento.

Figura 4 – Interação entre os defeitos em pavimentos flexíveis



Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

É válido mencionar que o trincamento, além de facilitar o ingresso de água na estrutura do pavimento, provocará erosão nas bordas das trincas. Essas erosões culminarão em panelas. O preenchimento destas dará origem aos remendos. Nesse cenário, com ou sem preenchimento, irão ocorrer alterações na superfície do pavimento e, novamente, irão surgir outras irregularidades.

Barella (2008) trata da importância da obtenção e utilização dos dados da avaliação de irregularidade longitudinal de um pavimento. Segundo o autor, as informações obtidas permitem visualizar a condição de rolamento e segurança de uma pista ou trecho.

Os dados podem ser utilizados, também, para mensurar e prever o desempenho do pavimento e sua capacidade de servir aos usuários. DNIT (2006) afirma que, para que sejam mantidos dentro de níveis aceitáveis quantos aos critérios estruturais e funcionais, os pavimentos devem ser submetidos a um contínuo e adequado processo de manutenção.

Sayers *et al.* (1986a) afirmam que o Índice Internacional de Irregularidade (*International Roughness Index – IRI*) foi aceito como o parâmetro que melhor define a irregularidade longitudinal da superfície do pavimento em um evento apoiado pelo *World Bank*, realizado no Brasil em 1982. O IRI, portanto, é uma escala numérica utilizada para quantificar os desvios verticais (irregularidades longitudinais) da superfície de um pavimento, comumente medido em m/km.

Conforme DNIT (2006), a partir de 1992 o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes passou instituir sua própria escala de IRI. Os valores dessa escala relacionam-se ao Quociente de Irregularidade (QI), que é outro índice para medição de irregularidade superficial de pavimentos, de modo que  $QI = 13 * IRI$ . Desse modo, a Tabela 2 apresenta os níveis de conceitos relativos às condições de superfície do pavimento.

Tabela 2 – Condição de Superfície do Pavimento por DNIT (2006)

<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)

A Tabela 3 apresenta os limites dos valores de IRI para cada classificação das condições de trafegabilidade (de Boa a Péssima) adotada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) e pelo programa *Highway Development and Maintenance* (HDM-4), conforme (DNIT, 2011)

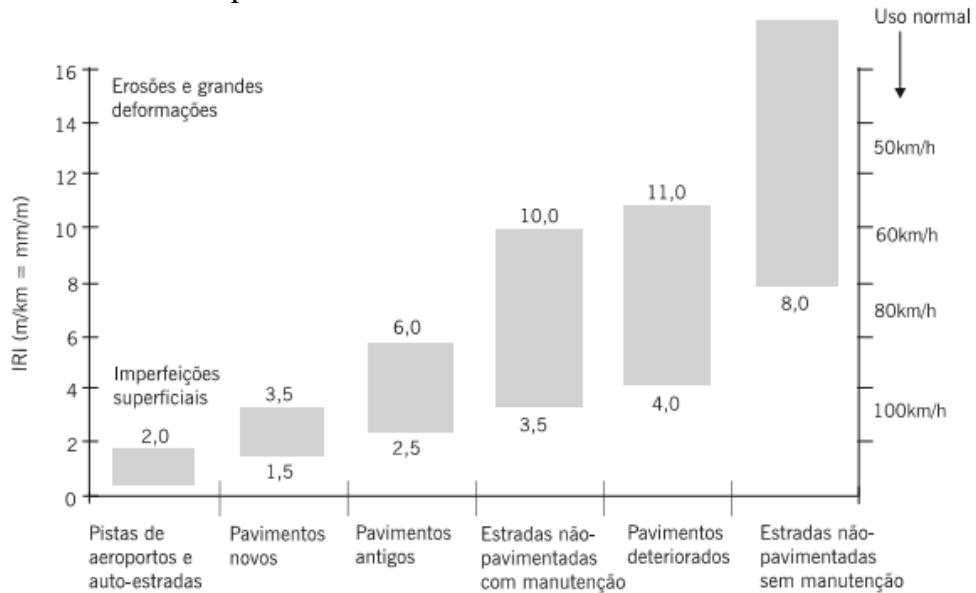
Tabela 3 – Condição de Superfície do Pavimento

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

Fonte: DNIT (2011)

A Figura 5 apresenta uma escala de aceitação de valores de IRI para os respectivos tipos de pavimentos. Do lado esquerdo da escala, tem-se os valores de IRI e do lado direito, as respetivas velocidade de medição.

Figura 5 – Valor de IRI x Tipo de Pavimento



Fonte: Adaptado de Karamihas e Sayers (1998)

Pela análise da Figura 5 é possível perceber que há uma faixa de valores de IRI para os respectivos tipos de pavimentos. Além disso, há a possibilidade de se obter diferentes valores de IRI aceitáveis para um dado tipo de pavimento dependendo da velocidade com a qual a medição foi realizada.

Segundo Karamihas (2014), a *Federal Highway Administration* (FHWA), é o departamento nacional que administra as rodovias americanas, apresenta outras faixas de valores para a classificação de um pavimento em relação ao IRI. A Tabela 4 apresenta os intervalos de IRI e as respectivas classificações do pavimento de auto-estradas americanas.

Tabela 4 – Condições de Superfície do Pavimento

<b>Condições da Superfície do Pavimento</b>	<b>IRI (m/km)</b>
Muito Bom	$IRI < 0,95$
Bom	$0,95 \leq IRI \leq 1,5$
Ruim	$1,5 \leq IRI$

Fonte: Karamihas (2014)

No caso de um pavimento considerado ruim devido ao IRI ser superior a 1,5m/km, em Karamihas (2014), a FHWA sugere que sejam tomadas ações corretivas nesse pavimento. Dessa forma, quanto menor o valor do IRI, melhor será considerado o pavimento. No entanto, de acordo com Fonseca (2013), devido às irregularidades da superfície de um pavimento novo e aos pequenos desvios oriundos dos processos construtivos, o IRI desse pavimento nunca será zero.

Dynatest (2015) classifica o IRI em ótimo e bom, regular ou ruim de acordo com a faixa de valores que ele se enquadrar. A Tabela 5 apresenta esta classificação com os respectivos valores de IRI.

Tabela 5 – Condições de Superfície do Pavimento

<b>Condições da Superfície do Pavimento</b>	<b>IRI (m/km)</b>
Ótimo e Bom (Pavimento sem problemas funcionais)	$IRI < 2,5$
Regular (Pavimento com certas deficiências funcionais)	$2,5 \leq IRI \leq 4,0$
Ruim (Pavimento com grandes problemas)	$4,0 \leq IRI$

Fonte: Dynatest (2015)

## 2.4 Classes de Equipamentos Utilizados na medição da Irregularidade Longitudinal

De acordo com Bernucci *et al.* (2007), a irregularidade pode ser levantada com medidas topográficas ou por equipamentos medidores do perfil longitudinal com ou sem contato com a superfície do pavimento.

Há ainda a possibilidade de medir a irregularidade indiretamente pelo uso de equipamento do tipo resposta, que medem o efeito da irregularidade nos veículos. A classe de cada equipamento depende do tipo e do princípio utilizado em cada levantamento.

Karamihas e Sayers (1998) classificam:

- a) Avaliação Direta: aquela realizada por equipamentos de Classe I (nível e mira, Dipstick, perfilômetro do TRL, ROMDAS z-250, ARRB *walking profilometer*, etc) e Classe II (GMR type *Inertial Profilometer* e demais equipamentos com sensores a *laser*, APL Trailer francês, etc.).
- b) Avaliação Indireta: aquela realizada por equipamentos de Classe III (TRL *Bump Integrator*, *Maysmeter*, *Merlin*, o *Roadmaster*, ROMDAS, *Roughmeter*, *Rolling straight edge*, etc.).

Bernucci *et al.* (2007) classificam como Avaliação Subjetiva da serventia aquela realizada por um painel de avaliadores. Esse tipo de avaliação é de Classe IV.

Sayers *et al.* (1986a) abordam de modo mais específico a classificação dos equipamentos medidores de irregularidade. De acordo com esse autor, seguem as classes e alguns exemplos:

#### **2.4.1 Classes I – Alta precisão de medição do perfil**

Esta classe representa os mais altos padrões de precisão para a medição do IRI. Um método de Classe 1 exige que o perfil longitudinal de trilha de rodas seja medido como base para o cálculo do valor do IRI. Isso deve ser executado como uma série de pontos de elevação devidamente espaçados ao longo do percurso. Para métodos estáticos, a distância entre amostras não deve ser superior a 250mm e a precisão nas medidas de elevação deve ser de 0,5mm em pavimentos muito suaves. Os perfilômetros de alta velocidade oferecem maior desempenho nas medições de IRI. No entanto, os resultados obtidos por este equipamento devem ser validados pelos resultados obtidos pelo método nível e mira para provar sua precisão. Os métodos de nível e mira e TRX *Beam* foram demonstrados como métodos válidos de Classe 1 para determinar IRI em uma ampla gama de níveis de irregularidade e tipos de rodovias para o comprimento de 320m.

Os métodos desta classe são aqueles que produzem medidas de tão alta qualidade de modo que a reprodutibilidade do IRI numérico não poderia ser melhorada. A repetibilidade nessas condições é de cerca de IRI = 0,3m/km em estradas pavimentadas e cerca de IRI = 0,5m/km para todos os outros tipos de estradas. Em muitos casos, um método que produz esse nível de precisão terá uma desvantagem associada ao exigir um grande esforço para fazer a

medida de irregularidade (por exemplo, pelo método nível e mira). Portanto, o método de Classe 1 é visto como sendo a referência para validar outros métodos ou quando são necessários dados especiais de alta precisão. Este trabalho adotou os dados obtidos no levantamento realizado pelo método nível e mira no trecho experimental objeto de estudo como referência para analisar o comportamento dos dados de aceleração.

#### **2.4.2 Classes II – Medição sem contato com a superfície**

Esta classe inclui todos os outros métodos em que o perfil é medido como base no cálculo direto do IRI, mas que não são capazes de fornecer medidas precisas como as obtidas por equipamentos de Classe 1. O valor do IRI calculado, a partir de uma medida de perfil Classe 2, pode não ser preciso ao limite prático devido a erros aleatórios ou de polarização em algumas condições. Esta classe inclui valores de IRI calculados a partir de perfis medidos com perfilômetros de alta velocidade e com métodos estáticos que não satisfazem os requisitos de precisão ou intervalo de medição exigidos pela Classe I.

Os perfilômetros de alta velocidade têm a desvantagem de serem os sistemas de instrumentação mais caros e complexos usados para medir a irregularidade e geralmente requerem operadores com treinamento de engenharia. No entanto, eles oferecem uma grande vantagem em poder obter medições de alta qualidade, rapidamente, sem exigir que o grande esforço seja gasto na manutenção da calibração.

#### **2.4.3 Classes III – Equipamentos tipo-resposta**

Os equipamentos dessa classe estimam o IRI a partir de equações de correlação. A maioria dos dados de irregularidade são obtido por equipamentos do tipo-resposta ou RTRRMS (*Response-Type Road Roughness Measuring System*). As medidas obtidas por um equipamento tipo-resposta depende da dinâmica de um veículo para determinar as medidas de irregularidade compatíveis com IRI. No entanto, as propriedades dinâmicas são únicas para cada veículo e mudam com o tempo. Desse modo, as medidas de inclinações médias (irregularidade) obtidas a partir de um equipamento desse tipo devem ser corrigidas na escala IRI usando uma equação de calibração, que é obtida experimentalmente para cada veículo específico. Quando ocorrem alterações, não existe uma correção simples que possa ser aplicada e todo o sistema do veículo rodoviário deve ser recalibrado.

Um método para medir a irregularidade se qualifica como Classe 3 se usar a abordagem de calibração por correlação, independentemente do tipo de instrumentação ou veículo usado para obter a medida não corrigida de irregularidade. Sem a calibração, não

existe uma verificação entre as medidas obtidas com dois equipamentos dessa classe nem a escala de IRI. Embora a maioria dos métodos de Classe 3 empreguem um medidor que acumule movimento de suspensão para medir as irregularidades, outros sistemas que estão em uso empregam acelerômetros ou outros tipos de instrumentação.

#### **2.4.4 Classes IV: Avaliação subjetiva**

Esse tipo de avaliação se faz útil quando se tem a necessidade de obter dados sobre o conforto ao rolamento de um determinado trecho, mas a alta precisão dos dados não é essencial. Esse tipo de julgamento é realizada com um grupo avaliadores a partir de suas experiências no trecho ou uma inspeção visual. No entanto, é importante que as medidas sejam relacionadas com a escala do IRI.

Quando essas estimativas subjetivas de irregularidade são convertidas para a escala IRI, a resolução é limitada a cerca de seis níveis de irregularidade com precisão variando de 2 a 6 m/km na escala IRI.

### **2.5 Equipamentos Utilizados na Medição da Irregularidade Longitudinal**

Nesta subseção, são apresentados alguns dos equipamentos medidores de perfil e/ou irregularidade longitudinal.

#### **2.5.1 Nível e mira (Classe I)**

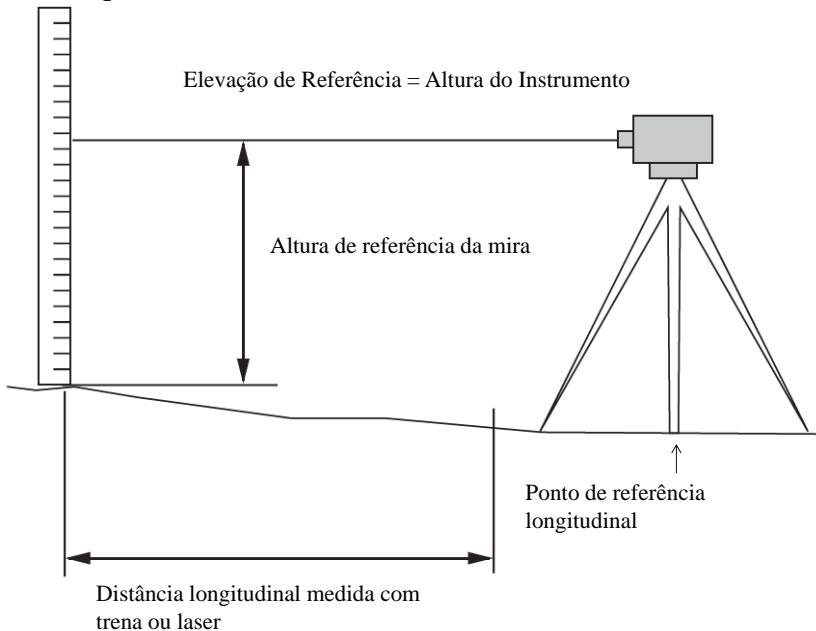
Segundo Bisconsini (2016), o levantamento topográfico feito por nível e mira é o mais conhecido e disponível internacionalmente. Além dessa utilidade de levantamento topográfico, esse equipamento é muito utilizado para a calibração de outros equipamentos, principalmente, medidores do tipo resposta. Essa classe de equipamentos será abordada posteriormente.

Para isso, a leitura do perfil do pavimento deve ser executada conforme o que está preconizado em DNER (1986). Dentre os critérios estabelecidos nessa norma estão os de que o levantamento longitudinal deve ser realizado nas trilhas de roda externa e interna e a cada 0,5m.

Esse equipamento consiste em uma haste graduada de precisão marcada em escala, normalmente, em centímetros, um nível, que é utilizado para estabelecer uma linha de referência horizontal, e uma trena, utilizada para marcar a distância longitudinal ao longo da trilha de roda. Os equipamentos de nível mais modernos já disponibilizam recursos como leitura da distância longitudinal a laser (elimina a necessidade de trena) e são capazes de fazer

a leitura na mira em código de barras (reduz o tempo de leitura vertical). A Figura 6 apresenta o equipamento nível e mira.

Figura 6 – Desenho esquemático do método nível e mira.



Fonte: Adaptado de Karamihas e Sayers (1998)

Sayers *et al.* (1986b) sugerem que a equipe de levantamento seja composta por três pessoas: uma para segurar a mira, uma para fazer a leitura do nível e outra para fazer as anotações da leitura. Outra sugestão é marcar os intervalos de medição com tinta, antes do início da leitura, para reduzir a possibilidade de erro do operador que estiver segurando a haste.

Durante a execução da referida atividade, a mira deve ser mantida plenamente na posição vertical. Esta exigência nem sempre é fácil de ser atendida, pois fatores como a fadiga do operador e o vento forte podem comprometer a verticalidade. Uma maneira de reduzir o erro é colocando-se na mira um nível de bolha para orientar o seu operador.

Esse tipo de problema ou erro, conforme a prática do operador da mira, vai sendo eliminado e os possíveis problemas serão causados ou por erro de leitura ou por erro de anotação da leitura. Segundo Sayers *et al.* (1986b), uma maneira de se eliminar um provável erro de leitura é através da utilização de dois níveis e uma mira. Os dois níveis, por estarem em cotas diferentes, farão leituras distintas, mas irão diferir sempre em uma medida constante. Tal técnica permite a detecção imediata de alguma leitura equivocada.

Apesar de já existir equipamentos capazes de armazenar os dados de leitura lidos nos levantamento por este método, o autor supracitado recomenda que o profissional responsável pelos registros das leituras deve executar seu trabalho com o máximo de comprometimento com a veracidade das informações passadas pelo operador do nível, pois os dados anotados é que serão processados para a reprodução do perfil longitudinal levantado. O anotador de leituras, normalmente, faz muitas anotações diárias e está sujeito à fadiga e ao erro. Uma das maneiras de se minimizar a possibilidade de equívocos desse profissional consiste em elaborar uma caderneta com o número de pontos que serão lidos durante cada etapa dos levantamentos e suas respectivas distâncias de um determinado referencial. Um exemplo disso seria o que está exposto na Figura 7, na qual o que a está impresso na folha representa é o estaqueamento e o que está escrito a mão representa a leitura do equipamento.

Figura 7 – Exemplo de caderneta de anotação

	Site Desc	Date	Start: 0 =
0	26.2 OLD - 7044	10/2	500.0
.25	12.75 83	25.25 91	37.75
.5	13 81	25.5 83	38
.75	13.25 80	25.75 90	38.25
1	13.5 80	26 90	38.5
1.25	13.75 77	26.25 82	
1.5	14 77	26.5 75	
1.75	14.25 79	26.75	
	14.5 78		

Fonte: Sayers *et al.* (1986b)

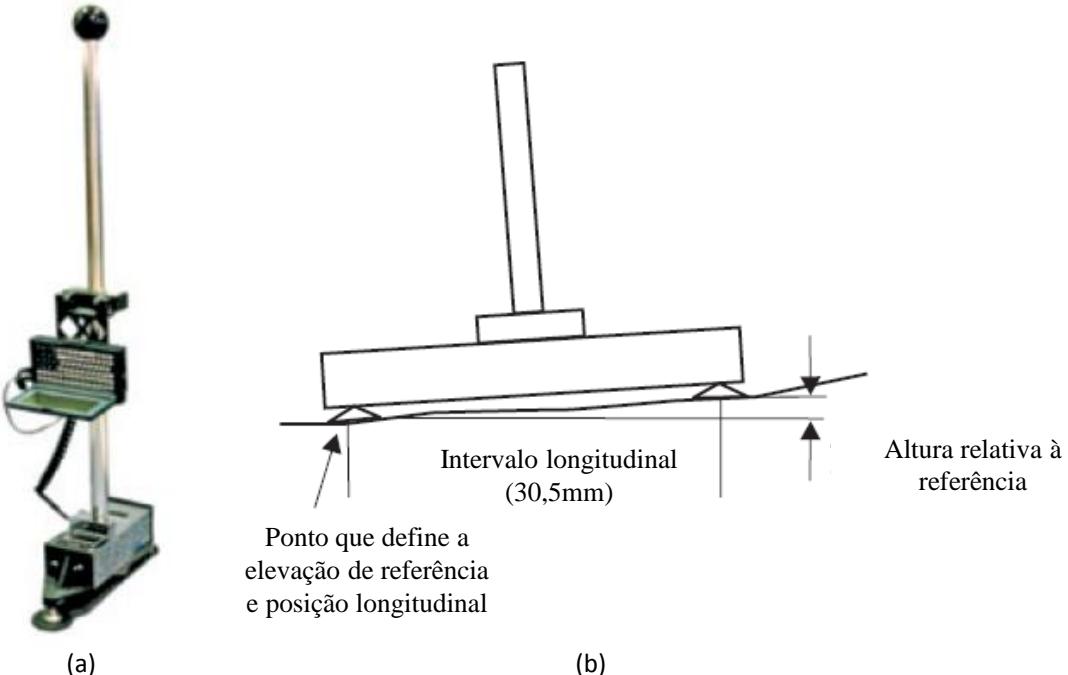
### 2.5.2 Dipstick (*Classe I*)

Segundo Bernucci *et al.* (2007), é um equipamento cujo método é manual e de baixo rendimento que pode ser utilizado para calibração de outros métodos destinados à medição de irregularidade.

Para executar uma medição com *Dipstick*, um operador caminha com o equipamento ao longo das trilhas das rodas girando-o em 180° em torno do segundo ponto de apoio de modo que os dois apoios estejam sempre em uma linha imaginária na longitudinal paralela ao eixo.

Esse dispositivo possui um inclinômetro que fornece leitura da ordem de milésimos de polegada. A Figura 8 apresenta esse equipamento portátil e seu esquema de funcionamento.

Figura 8 – Dipstick (a) e Esquema de Funcionamento (b)



Fonte: Bernucci *et al.* (2007)

### 2.5.3 Perfilômetro Inercial (Classe II)

Karamihas e Sayers (1998) afirmam que um instrumento utilizado para produzir uma sequência de dados relativos a um perfil verdadeiro sobre uma linha imaginária na rodovia é chamado de perfilômetro. Esse equipamento trabalha através da combinação de três fatores: (a) uma cota de referência; (b) uma cota relativa à de referência e (c) uma distância longitudinal.

Para Barella (2008), perfilômetros ou perfilógrafos são as designações dadas aos equipamentos medidores de perfil. Esse equipamento gera uma saída digital ou analógica relacionada à superfície pela qual ele passou.

Segundo Balbo *et al.* (2005), perfilômetro é um equipamento montado em um veículo que registra simultaneamente o deslocamento longitudinal, a altura do veículo até o pavimento e a aceleração vertical do veículo. O sistema operacional do perfilômetro processa os dados de aceleração vertical e os transforma em deslocamento através de duas integrações matemáticas sucessivas.

Com o valor do deslocamento calculado, é possível corrigir as medidas de altura do veículo e estimar o perfil longitudinal do pavimento. Ainda conforme Balbo *et al.*, o perfil obtido por um perfilômetro tem uma boa relação com o perfil verdadeiro, especialmente para o cálculo da irregularidade.

Para Barella (2008), só existe um perfil verdadeiro em cada linha imaginária. Dessa forma, duas medições de perfil longitudinal só serão iguais se forem realizadas exatamente sobre a mesma linha imaginária e sempre com as mesmas configurações de veículo e velocidade. O autor define um bom perfilômetro como aquele equipamento que gera como saída um perfil que seja relacionado ao perfil real e que apresente as características procuradas em uma dada medição e, a partir desse perfil, é possível calcular os índices de irregularidades.

Barella (2008) afirma que quanto maior for a velocidade do perfilômetro inercial, maiores serão os comprimentos de onda que ele consegue incluir no perfil. Essa é uma percepção semelhante a experimentada pelos usuários no interior de um veículo em movimento. Por isso, não é recomendado que esse tipo de equipamento execute medições com velocidades inferiores a 30km/h, pois isso poderia provocar inconsistências nos valores de irregularidades calculados. Dada a influência da velocidade no comportamento dos equipamentos de medição, neste trabalho, os ensaios realizados no garfo escocês foram realizados com velocidade de oscilação distintas e, nos ensaios realizados com a bicicleta, variou-se as velocidades das passadas no trecho experimental, conforme será visto posteriormente.

O perfilômetro é composto por um ou mais módulos de laser utilizados para a medição, sem contato, da distância entre o veículo e o pavimento; um ou mais acelerômetros, cuja função é mensurar a aceleração vertical do veículo e um odômetro, que fica instalado nas rodas. Além desses itens, para se completar a avaliação de irregularidade do pavimento, se fazem necessários um sistema de controle eletrônico e um *software* para armazenar e gerenciar os dados obtidos pelos sensores de distância e aceleração. A Figura 9 apresenta partes de um perfilômetro inercial com seus módulos *lasers* na régua acoplada ao carro.

Figura 9 – Componentes do perfilômetro



Fonte: Pavetesting (2017)

O módulo laser mede a distância do equipamento ao pavimento acrescida das variações da suspensão do automóvel e o acelerômetro mede somente as variações da suspensão. Subtraindo-se o segundo do primeiro, obtém-se as características de irregularidade do pavimento.

Os resultados da avaliação de superfície de um pavimento realizado através de perfilômetro serão processados por um *software*, por exemplo, o *SSI Profiler V2.6* ou no *software Proval (View and Analyze Pavement Profiles)*. O resultado desse processamento de dados é um relatório de irregularidade do pavimento. No caso do documento gerado pelo *software SSI Profiler V2.6*, são registrados dados como estaca de início e fim do trecho avaliado, inclinação da pista, informações de calibração do equipamento, gráficos do perfil da pista, informações sobre as irregularidades da pista e a quantidade de defeitos encontrados pelo equipamento.

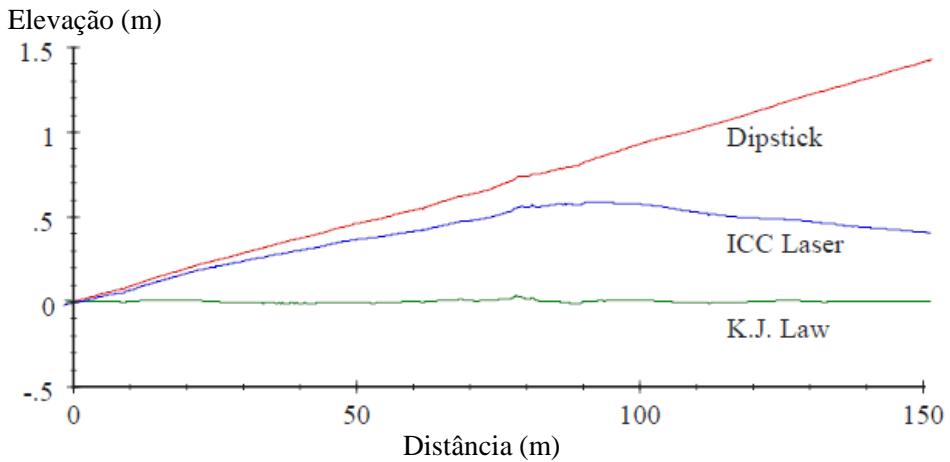
Segundo Karamihas e Sayers (1998), os perfilômetros inerciais apresentam as seguintes características:

- a) Necessitam estar em movimento para realizar as medições.
- b) Podem ser utilizados na velocidade da via.
- c) Não geram perfis exatamente iguais aos obtidos estaticamente como o obtido por um nível e mira.

Ainda de acordo com Karamihas e Sayers (1998), um perfilômetro inercial pode fornecer um ou mais perfis longitudinais que tem relação com o perfil verdadeiro do pavimento a depender o número de sensores de medição de altura que for utilizado. Além disso, é possível calcular os índices de irregularidade utilizando-se os dados de aceleração pós-processamento. O perfilômetro inercial permite ainda o cálculo do afundamento plástico do pavimento em trilhas de roda se forem utilizados pelo menos 3 sensores de altura convenientemente posicionados.

A Figura 10 apresenta três perfis obtidos a partir de um Dipstick e dois perfilômetros inerciais para o mesmo seguimento.

Figura 10 – Perfis obtidos por três equipamentos diferentes



Fonte: Karamihas e Sayers (1998)

Pelo gráfico da Figura 10, é possível notar que o Dipstick obteve uma elevação de 1m para distância longitudinal de 100m. O perfilômetro ICC Laser apresentou uma elevação de 0,5m para 100m de distância longitudinal. O perfilômetro K.J Law, porém, apresentou um perfil bastante nivelado.

Fica claro, portanto, que equipamentos de diferentes fabricantes, ao mensurar um mesmo perfil verdadeiro, podem apresentar níveis de precisão distintos entre si. Além disso, é possível que um perfilômetro inercial apresente dados de perfil longitudinal diferentes para um mesmo trecho em medições diferentes sendo utilizado no mesmo veículo com diferentes configurações antes de cada teste (Karamihas e Sayers, 1998).

Segundo Wang (2006), em superfície cuja textura apresenta muitos ressaltos, os perfilômetros iniciais apresentam maiores erros de exatidão. Isso deve-se ao fato de que, apesar de o pneu do veículo não tocar em toda a superfície do pavimento, por causa da excessiva irregularidade de comprimento de ondas pequenos, o *laser* tem a capacidade de medir essa superfície por completa.

Outra limitação do perfilômetro a laser, ainda de acordo com Wang (2006), é que as medições não podem ser realizadas em superfícies molhadas de pavimento. Os módulos *laser* realizam suas leituras por reflexão. Ou seja, a luz emitida contra o pavimento reflete e, pelo tempo de retorno é calculada a distância até o pavimento. Desse modo, na presença de água ou outro líquido superficial no pavimento essa reflexão se tornaria difusa e instável.

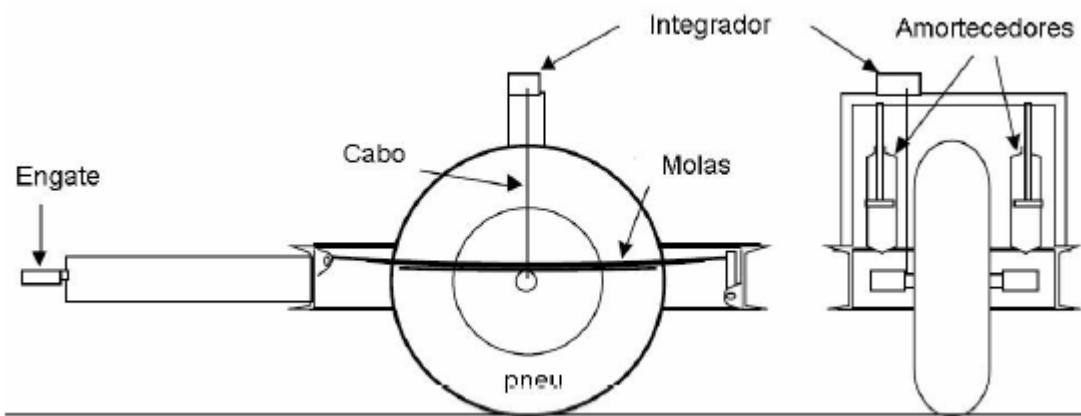
#### 2.5.4 BPR Roughmeter (Classe III)

De acordo com Barella (2008), na década de 1920 foi construída uma das primeiras pistas de teste de pavimentos do mundo, no estado americano de Illinois, que ficou conhecida com o *Bates Road Test*. Essa pista foi construída com diferentes materiais em cada uma de suas seções e nela foi utilizado um medidor de irregularidade para avaliar o desempenho do pavimento.

O equipamento utilizado foi designado por *BPR Roughmeter*, nome dado em alusão ao *Bureau of Public Roads*, que, atualmente, é a *Federal Highway Administration* (FHWA). Segundo Barella (2008), esse é um equipamento rebocável e isso se configurou, na época, como seu grande diferencial em relação aos demais aparelhos utilizados para esse fim.

O *BPR Roughmeter*, segundo Gillespie (1992), é um equipamento do tipo-resposta de roda única e constituído por um bloco de massa conhecido, mola e amortecedor padronizados. As irregularidades da superfície do pavimento medidas por este equipamento eram contabilizadas através do deslocamento vertical da roda em relação à massa e eram registradas por um integrador acoplado a um contador elétrico. O contador acumulava os deslocamentos em polegadas e o resultado da avaliação da superfície do pavimento realizada através do equipamento era conhecido por *Roughness Index* (Índice de Irregularidade), que era exibido em polegadas por milha (pol/in). A Figura 11 mostra o desenho esquemático do *BPR Roughmeter* e a Figura 12 mostra um *BPR Roughmeter* em operação.

Figura 11 – Desenho esquemático do *BPR Roughmeter*.



Fonte: adaptado de Gillespie (1992)

Figura 12 - BPR *Roughmeter*

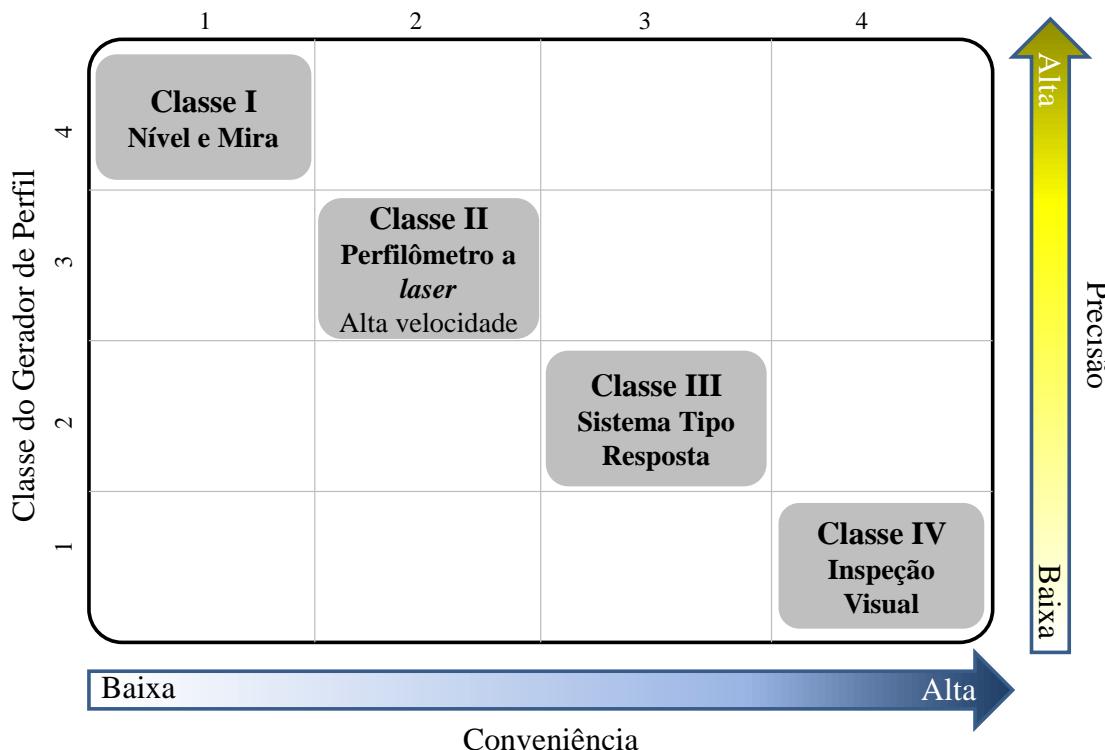


VicRoads Centenary 1913-2013

Fonte: BPR (2017)

A Figura 13 apresenta a relação entre a precisão na medição dos equipamentos e a conveniência de seus respectivos usos. Pela observação da imagem, é possível perceber que, quanto maior precisão, maior será o trabalho para operar um dado equipamento. No entanto, os métodos de medição mais laboriosos são os mais precisos.

Figura 13 – Relação Conveniência e Precisão dos Equipamentos



Fonte: Adaptado de TOMIYAMA et al. (2012)

## 2.6 Navegação Inercial

A Navegação inercial envolve uma mistura de instrumentação inercial, matemática, projeto do sistema de controle e geodesia. A tecnologia é usada em muitas atividades militares, civis, de engenharia e científicas. Exemplos incluem o controle de navegação e altitude de aeronaves, submarinos, mísseis balísticos e de cruzeiro e naves espaciais (CHATFIELD,1997).

Ainda segundo Chatfield (1997), um sistema de navegação utiliza dados obtidos por acelerômetro e giroscópio referentes ao espaço inercial, mas a velocidade, a posição e a orientação são necessárias em um sistema referenciado à Terra. Consequentemente, sistemas de coordenadas, transformações de coordenadas e unidades são elementos inerentes da navegação inercial.

Na definição de Santana (2004), navegação inercial é o processo pelo qual se estabelecem informações sobre posição e velocidade de um veículo bem como a sua direção em relação a um referencial utilizando informações obtidas por sensores inerciais.

Santana (2004) afirma também que, de forma geral, os sinais oriundos dos sensores inerciais apresentam ruídos de natureza indeterminada. Esses ruídos, ao serem integrados matematicamente, se acumulam à medida que são processados e, dependendo do

nível de exatidão dos sensores inerciais, em algum tempo a trajetória reconstruída por meio dos sinais destes dispositivos poderá apresentar desvios na ordem de quilômetros. Além dessa imprecisão na obtenção dos dados, existe limitação da precisão do modelo geofísico, que tendem a modificar a magnitude e direção do vetor gravitacional, que torna impossível compensar com acuraria os efeitos gravitacionais sobre a aceleração. Por estes e outros motivos, um sistema de navegação inercial de baixo desempenho não tem a capacidade de proporcionar uma solução satisfatória na estimativa de uma trajetória.

Esses sensores inerciais são controlados por microcontroladores. Nas sessões que seguem, são abordados os microcontroladores, o acelerômetro, alguns erros e ruídos possivelmente gerados por este sensor e alguns filtros para tratar desses ruídos.

### **2.6.1 Plataforma Arduino e Acelerômetro**

Segundo Silva *et al.* (2014), o conceito Arduino surgiu na Itália no ano de 2005, com o objetivo de criar um dispositivo para controlar projetos e protótipos construídos de uma forma mais acessível do que outros sistemas disponíveis no mercado.

A plataforma Arduino consiste em uma plataforma de código aberto baseada em *hardware* e *software* para as áreas de automação e robótica. É possível conectar a essa plataforma diversos tipos de componentes eletrônicos direcionados e programados para uma determinada atividade. Essa plataforma usa um Microcontrolador ATMEGA2 com a função de receber e entregar o fluxo de informações de maneira controlada por uso de *software*. A Figura 14 apresenta um microcontrolador arduino modelo Uno R3.

Figura 14 – Arduino – Plataforma UNO



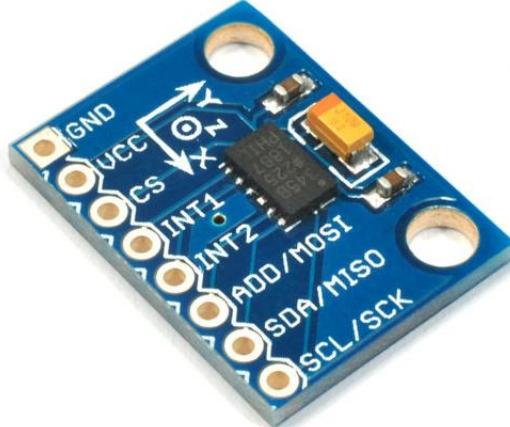
Fonte: LEARNCAFE (2017)

Acelerômetros, segundo Campos (2013), são sensores que medem aceleração. São constituídos, normalmente, por uma massa de reação contida em uma estrutura estacionária. O

funcionamento desse sensor consiste em fazer a leitura da oscilação da massa provocada pela inércia todas as vezes que o corpo entra em movimento. A força exercida pela massa é equilibrada por uma mola e, como o deslocamento da massa suspensa permitido pela mola é proporcional à força aplicada, a aceleração do corpo é proporcional ao deslocamento da massa.

Atualmente, a maioria dos acelerômetros registram sinais de aceleração nos eixos X, Y e Z. Além disso, medem a aceleração estática da gravidade e acelerações dinâmicas resultantes de movimento, vibrações ou choques mecânicos. A obtenção dos dados da aceleração da gravidade é vulnerável ao posicionamento dos sensores durante às medições. A Figura 15 apresenta um acelerômetro e as indicações dos respectivos eixos.

Figura 15 - Acelerômetro e as indicações dos eixos



Fonte: IDELETRÔNICA (2017)

É possível observar que parte superior da Figura 15 há uma legenda referente à orientação dos eixos. Na referida imagem, o eixo X corresponde ao comprimento do sensor, o eixo Y, à largura e o eixo Z, representado por um ponto envolto por um círculo, é perpendicular ao plano desse circuito impresso.

Esses sensores, no entanto, registram ruídos e erros de leitura junto com os sinais esperados de aceleração, que consistem em distúrbios aleatórios dos sensores e são os principais responsáveis por sua imprecisão. Conforme Papoulis *et al.* (2002), os erros mais comuns são os de *bias* ou polarização, fator de escala, deslocamento térmico, erros de quantização e desalinhamento.

De acordo com as definições de Papoulis *et al.* (2002), erro de bias ou erro de polarização constante pode ser interpretado como sendo um nível de sinal constante ou que varia muito lentamente, independente do sinal de entrada. O erro de fator de escala ou erro de calibração refere-se ao erro que é proporcional ao sinal de entrada e exibem algum grau de

não linearidade. Deslocamento térmico é o tipo de erro causado devido à temperaturas extremas positiva ou negativamente e esse tipo de erro deve ser compensado eletronicamente.

Erros de quantização ocorrem devido à discretização dos sinais de saída dos acelerômetros. Esse tipo de erro é proporcional à magnitude da quantização. Por fim, há a possibilidade de ocorrer erros de desalinhamento mecânico entre os eixos dos sensores. Esse desalinhamento causa ruídos nos sinais de saída do acelerômetro que são consideradas como constantes aleatórias (PAPOULIS *et al.*, 2002).

## 2.7 Processamento de Sinais

De acordo com Nunes *et al.* (2006), processamento de um sinal consiste em analisar os dados de um sinal, representado por uma sequência de números, pelo uso de matrizes e equações matemáticas. Dessa forma, é possível realizar transformações e extrair informações desses sinais, que são realizadas, basicamente, por operações adição ou multiplicação ou ainda fazendo-se uso de microprocessadores especiais.

Assim como a maioria das fontes geradoras de sinais, os acelerômetros também geram sinais analógicos. Esses sinais, no entanto, devem passar por um conversor analógico-digital (ADC) para que sejam convertidos em sinais digitais. Desse modo, o sinal passa a ser representado por um número finito de valores instanciados no tempo (INGLE *et al.*, 2010).

Ainda conforme Ingle *et al.* (2010), os sinais analógicos, como os de voz, de luz e os de corrente elétrica podem ser interpretados e alterados por computadores e outros dispositivos dotados de capacidade de processamento, como *smartphones* e microcontroladores. A maioria dos módulos de aceleração (acelerômetros) conta com um ADC na sua arquitetura e os sinais de saída desse módulo já são digitais. Os responsáveis pela alteração dos sinais digitais são os filtros digitais.

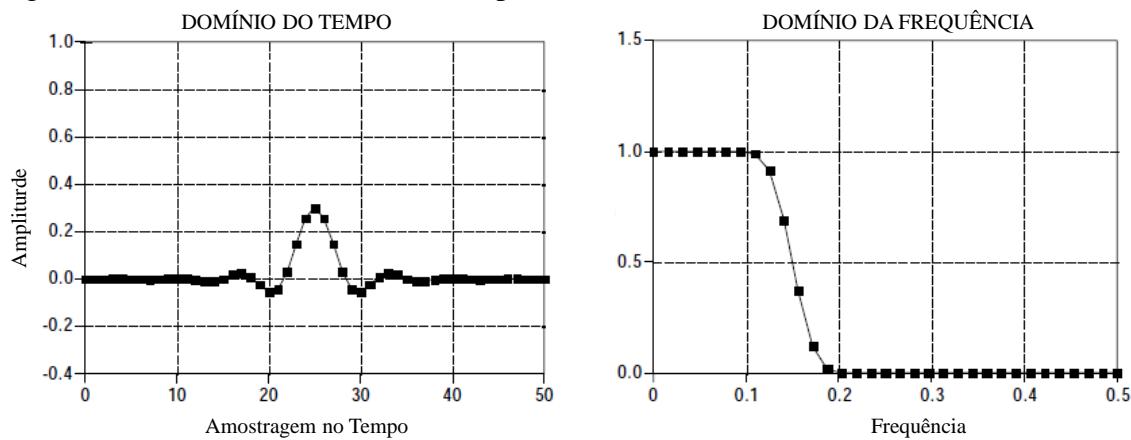
### 2.7.1 Filtros digitais

No processamento de sinais, a função do filtro é separar as informações significativas daquelas não importantes. Segundo Ingle *et al.* (2010), as operações de filtragem, normalmente, são executadas no domínio da frequência e algumas de suas aplicações são remoção de ruído de fundo indesejado e de interferências, separação de bandas de frequência e modelagem do espectro do sinal.

A ferramenta utilizada para transformar os sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência é a Transformada Rápida de Fourier (*Fourier Fast Transform* -

FFT). A Figura 16 apresenta a diferença de um sinal representado no domínio do tempo e no domínio da frequência.

Figura 16 - Efeito da Transformada Rápida de Fourrier



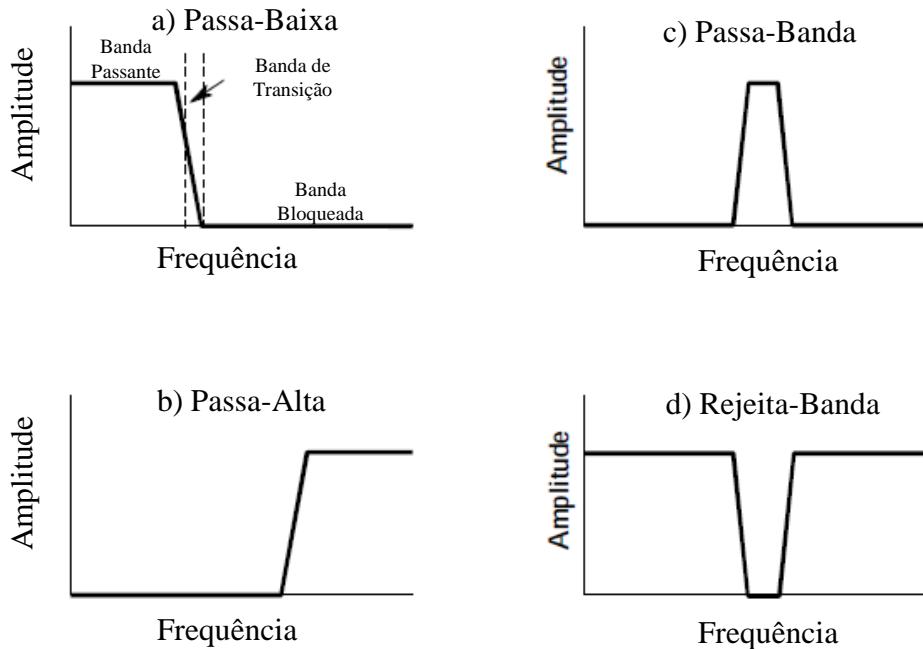
Fonte: Adaptado de Smith (1997)

Segundo Smith (1997), a principal proposta dos filtros digitais é permitir a passagem inalterada de algumas frequências do sinal enquanto bloqueia outras frequências. Nesse caso, existem os filtros Passa Banda e os Rejeita Banda. A divisão entre a banda que vai passar ou não é definida pela frequência de corte (*cutoff frequency*).

O filtro digital padrão, de acordo com Smith (1997), é o filtro Passa-Baixa. Esse filtro permite a passagem de dados cuja frequência é menor que a frequência de corte. A partir desse filtro, foram projetados outros conforme o interesse nas frequências esperadas. São eles os filtros Passa-Alta, Passa-Banda e o Rejeita-Banda.

O filtro Passa-Alta permite a passagem dos dados cuja frequência é maior que a frequência de corte. O filtro passa Passa-Banda permite a passagem dos dados cuja frequência esteja em um intervalo de frequências específico. Já o filtro Rejeita-Banda bloqueia a passagem dos dados cuja frequência esteja em um intervalo de frequência específico. A Figura 17 apresenta o efeito desses quatro filtros.

Figura 17 – Efeito dos Filtros Digitais



Fonte: Adaptado de Smith (1997)

### 2.7.2 Filtro média móvel

Um exemplo de filtro passa-baixa é o média móvel, que pode ser utilizado com facilidade em processamento de sinais ou imagens. Esse filtro apresenta bom desempenho na redução de ruído branco quando utilizado no domínio do tempo. A quantidade de ruído reduzida é igual a raiz quadrada do número de pontos no filtro (SMITH, 1997).

Pelo uso desse tipo de filtro, o valor de dado  $y[i]$  será a média de  $n$  elementos de sua vizinhança. Por exemplo, o valor de  $y[50]$ , será o resultado da média entre ele e os 4 elementos posteriores a ele, conforme a Equação 01. Neste exemplo, o tamanho da janela é de 5 posições, referente à quantidade de elementos que farão parte da média.

$$y[50] = \frac{y[50] + y[51] + y[52] + y[53] + y[54]}{5} \quad (1)$$

### 2.7.3 Filtro de Kalman

Segundo Santana (2011), a reconstrução de trajetórias pela navegação realizada a partir de sensores inerciais é interpretada como um problema de estimativa de estados. Nesse contexto, por um modelo matemático e um conjunto de dados, é possível estimar o valor de seus estados a cada instante.

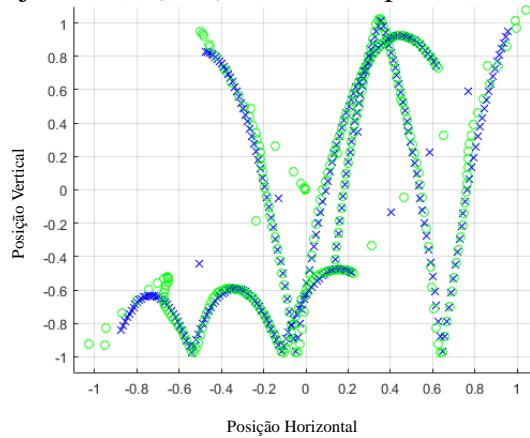
Os sistemas reais, no entanto, estão sujeitos a erros e a ruídos aleatórios. Para contornar esse fato, essa incerteza de informações entre os dados significativos deve ser estimada juntamente com a estimativa dos estados dos dados. No caso de um veículo, as entradas do sistema são os dados obtidos pelo acelerômetro e os estados a serem estimados são, entre outros, a velocidade e a posição. Uma das maneiras de se estimar esses estados é pela utilização do filtro de Kalman.

De acordo com Welch e Bishop (1995), o filtro de Kalman é um algoritmo que contem equações matemáticas possíveis de serem utilizadas para estimativa estocásticas a partir de medições de sensores que admitem ruído na leitura dos dados. O filtro de Kalman tem o nome de Rudolph E. Kalman, autor de soluções recursivas para o problema de filtragem linear de dados discretos.

Em suma, o filtro de Kalman é um conjunto de equações matemáticas que implementa um estimador muito eficiente em minimizar a covariância do erro estimado desde que sejam atendidas algumas condições. Essas condições necessárias para se obter o máximo de eficiência do filtro de Kalman raramente são atendidas e, normalmente, o filtro funciona bem (Welch e Bishop, 1995).

A Figura 18 apresenta um exemplo da trajetória real de um dado objeto e a estimada pelo filtro de Kalman. O algoritmo utilizado para a obtenção desse resultado específico está disponível em Mathworks (2017).

Figura 18 - Trajetória do objeto: Real (azul) e Estimada por Kalman (verde)



Fonte: Mathworks (2017)

## 2.8 Estatística – Teste de Hipóteses

De acordo com Devore (2006), para avaliar uma determinada situação, um parâmetro pode ser estimado a partir de dados de uma amostra por um parâmetro único (uma estimativa pontual) ou por um intervalo de valores aceitáveis (intervalo de confiança). Normalmente, o objetivo de uma investigação não é estimar esse parâmetro ou intervalo, mas

decidir se uma dada hipótese é verdadeira ou se deve ser rejeitada. Esse processo é conhecido como teste de hipótese.

Ainda segundo Devore (2006), uma hipótese é uma alegação ou afirmação sobre o valor ou condição de um único parâmetro (ex.: características de um sinal de aceleração). Em qualquer problema de hipótese, existem duas suposições contraditórias que devem ser consideradas. A primeira é a Hipótese Nula ( $H_0$ ), que admite que uma certa condição inicial é assumida como verdadeira, e a outra é a Hipótese Alternativa, que é a hipótese contraditória à nula.

Para o melhor entendimento dos testes de hipótese, é possível fazer uma analogia com um processo criminal. Nesse caso, a hipótese nula ou inicial é que um réu é inocente e a hipótese alternativa é que o réu é culpado. Somente com a presença de forte evidência de que o acusado é culpado, a hipótese nula poderá ser descartada.

Portanto, a hipótese nula só será rejeitada para em favor da hipótese alternativa se a evidência das amostras sugerir que a  $H_0$  seja falsa. Se a amostra não contradisser fortemente a  $H_0$ , a hipótese nula continuará tida como verdadeira. Assim, as duas conclusões são possíveis de uma análise de testes de hipóteses é se a hipótese nula deve ser rejeitada ou não.

O procedimento de teste de hipótese consiste em definir uma estatística de teste, que é uma função dos dados da amostra na qual a decisão se baseia, e estabelecer um intervalo de rejeição, que é o conjunto de todos os valores do teste para os quais  $H_0$  será rejeitada. Para esse intervalo de rejeição, deve-se estabelecer um nível de significância, que tradicionalmente é de 10%, 5% e 1%. Quanto menor o nível de significância, mais confiáveis serão os testes. Em um teste cujo nível de significância é de 5%, pode-se afirmar que um determinado parâmetro tem 95% chance de estar em um intervalo de confiança. Dessa forma, para esta pesquisa, se o resultado de teste de hipótese for a probabilidade  $P < 0,05$  (5%), a hipótese nula será rejeitada (DEVORE, 2006).

De acordo como PortalAction (2017), uma das maneiras de se avaliar a qualidade do ajustes de um determinado modelo é através do valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Esse coeficiente representa o quanto o modelo é capaz de explicar os dados coletados. O valor de  $R^2$  poderá aumentar com a adição de novas variáveis ao modelo. Isso não significa, porém, que um modelo com muitas variáveis seja melhor que o anterior.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo de metodologia apresenta a versão final do protótipo composto por acelerômetro e arduino, os equipamentos utilizados nos ensaios (garfo escocês, carrinho de trilho de ar e a bicicleta) e os *softwares* utilizados no processamento dos dados.

#### **3.1 Metodologia**

Conforme dos objetivos específicos deste trabalho, pretende-se desenvolver um equipamento capaz de obter sinais de aceleração. Além disso, pelos sinais de aceleração vertical, visa-se obter dados do perfil e da irregularidade de um trecho experimental do *Campus do Pici* da Universidade Federal do Ceará.

Para avaliar a capacidade de o acelerômetro obter o curso de dado perfil, este sensor foi submetido a três ensaios com trajetórias distintas entre si. O primeiro consistiu em acoplar o acelerômetro a um garfo escocês, cujo eixo oscila com amplitude e frequências conhecidas. A trajetória esperada do acelerômetro neste ensaio seria uma senóide. O segundo ensaio utilizou um carrinho de trilho de ar, por se tratar de uma trajetória horizontal, plana e sem curvas. A trajetória esperada do acelerômetro neste ensaio seria uma linha reta. Os dois primeiros ensaios foram realizados em laboratório. O terceiro ensaio consiste em acoplar o acelerômetro em uma bicicleta com o intuito de se obter o perfil longitudinal de um trecho experimental e a trajetória esperada seria o perfil do trecho. Os dados de aceleração obtidos em cada um dos ensaios foram tratados e a análise desses dados foi realizada de modo visual.

Quanto ao potencial de o acelerômetro ser apropriado para avaliar a irregularidade longitudinal de um pavimento, foram realizados ensaios no trecho experimental com o acelerômetro acoplado horizontalmente ao guidão de um bicicleta. As variáveis deste ensaio foram a velocidade da bicicleta, o sentido das passadas no trecho e a taxa de obtenção de dados. Os dados de aceleração obtidos em cada um dos ensaios foram tratados e as respectivas análises foram realizadas de modo visual e por teste de hipótese, que verificou a interferência da irregularidade da superfície do pavimento nos sinais de aceleração obtidos pelo acelerômetro.

Para a análise dos dados referente ao perfil e à irregularidade longitudinal, foram utilizados dois filtros digitais, o filtro de Kalman e o filtro média móvel para que fosse aferido o efeito do filtro no comportamento dos dados de aceleração vertical.

O acelerômetro utilizado nos ensaios é capaz de captar as acelerações nos eixos X, Y e Z, mas, nesta pesquisa, foram utilizados somente os dados de aceleração do eixo Z

(vertical). Se o acelerômetro estiver na posição horizontal, o eixo Z estará perpendicular ao plano do circuito.

### 3.2 Montagem do Protótipo

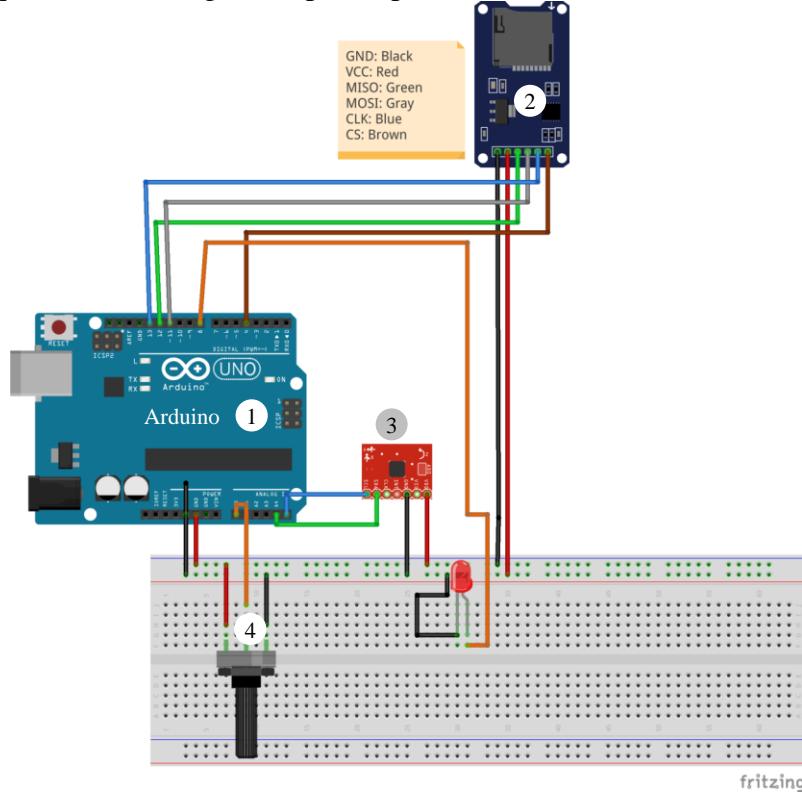
A tecnologia adotada para prototipação foi plataforma Arduino modelo UNO R3. Essa é uma plataforma de desenvolvimento eletrônico de código aberto e de baixo custo, baseada no microcontrolador Atmel AVR ATmega328P.

A plataforma foi adotada tendo em vista o baixo custo, a vasta documentação disponível, a compatibilidade com diversos periféricos existentes no mercado e a viabilidade para desenvolver uma prova de conceito em tempo hábil. Os outros componentes adotados foram, o módulo acelerômetro e giroscópio de 3 eixos (referência: 6 DOF MPU-6050 GY-521) e o módulo Catalex Micro SD *Card Adapter*. Esse último módulo é o responsável por escrever os dados no cartão de memória do sistema.

Quanto ao funcionamento do acelerômetro, os dados de aceleração do eixo Z foram capturados e armazenados em um arquivo de texto em um cartão micro SD. Quando o sistema estava alimentado eletricamente e o potenciômetro estava desligado, rotacionado para sentido anti-horário, o módulo de aceleração permanecia realizando leituras, mas sem armazenar os dados obtidos. Quando o potenciômetro era girado no sentido horário até sua posição final, o referido módulo era ativado e, então, era criado um arquivo de texto com um nome relacionado ao número total de arquivos criados. Os desafios encontrados durante a montagem do protótipo do equipamento estão registrados no Apêndice A deste trabalho.

Assim, a arquitetura do protótipo segue o esquema da Figura 19 e a Figura 20 apresenta essa versão implementada. Essa foi a versão utilizada nos ensaios e obtenção dos dados de laboratório e de campo realizados nessa pesquisa.

Figura 19 – Esquema da montagem do protótipo

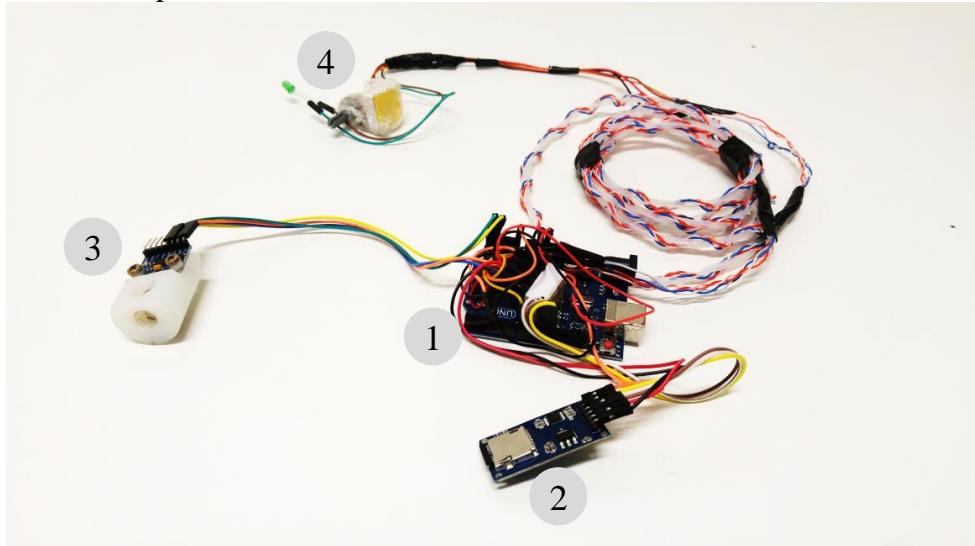


Fonte: Elaborada pelo autor

Os números na Figura 19 e Figura 20 indicam, respectivamente:

- 1 → Microcontrolador arduino
- 2 → Módulo de armazenamento de dados
- 3 → Módulo de Aceleração (Acelerômetro)
- 4 → Potenciômetro

Figura 20 - O Protótipo



Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.3 Uso de bicicleta

Conforme mencionado no capítulo introdutório, os perfilômetros atuais são acoplados aos veículos que os transportam. Esses equipamentos são muito caros (~R\$400.000,00) e, adicionado ao custo de aquisição ou aluguel do equipamento, tem-se o custo do veículo e dos operadores. Além disso, para se fazer uma medição com um perfilômetro a laser, fazem-se necessários, no mínimo, duas pessoas, sendo uma para dirigir o veículo e outra para operar o equipamento ou auxiliar na obtenção dos dados.

Considerando que uma das propostas desta pesquisa é desenvolver um equipamento de baixo custo e fácil manuseio, optou-se por acoplar o acelerômetro em uma bicicleta, que é um veículo de baixo custo e requer apenas um operador. O acoplamento do equipamento na bicicleta foi realizado com uso de plástico filme para prender o arduino, os cabos e a bateria ao veículo. Essa fixação, porém, poderia ser simplificada se fosse construído um suporte adaptado à bicicleta e ao equipamento. A Figura 21 apresenta a bicicleta utilizada nessa pesquisa.

Figura 21 – A Bicicleta



Fonte: Elaborada pelo autor

Os números indicam, respectivamente:

1 → Motor elétrico

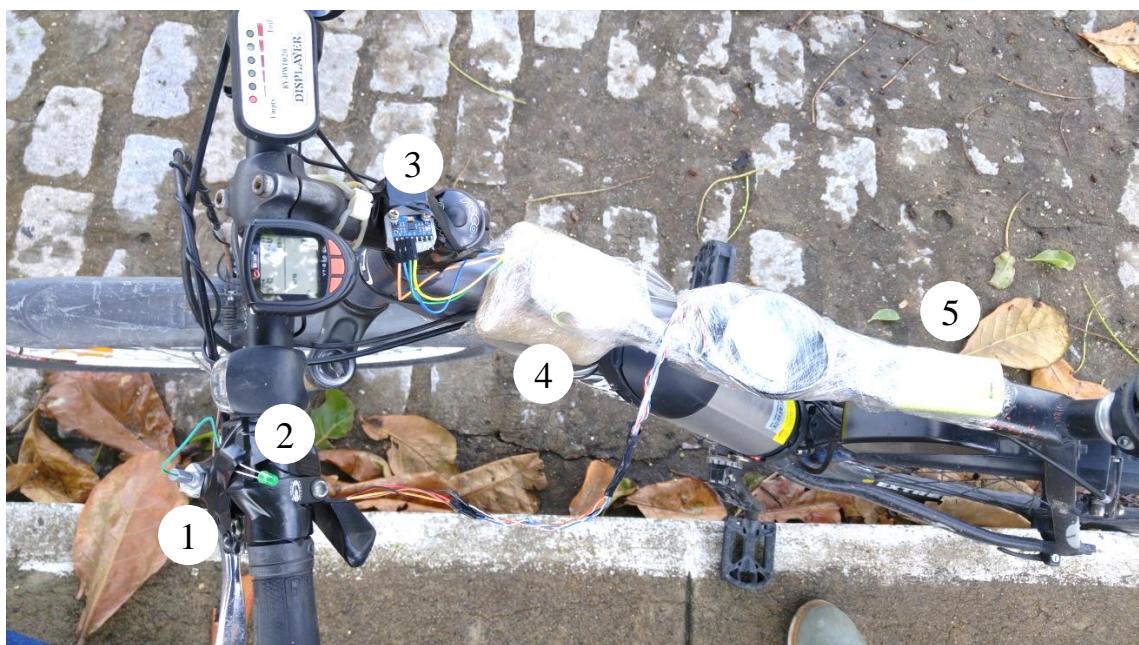
2 → Bateria

3 → Central de controle do sistema

A bicicleta do estilo *Mountain Bike* com aro de 26 polegadas de diâmetro, suspensão pneumática com trava e apropriada para todos os tipos de terreno. É uma bicicleta elétrica adaptada que pesa, aproximadamente, 20kg e cuja pressão dos pneus estava em 50 PSI.

O *kit* elétrico da bicicleta, cujo custo de aquisição representa 25% do valor do equipamento com a bicicleta, é composto por uma bateria, um motor elétrico e uma central de controle do sistema. A bateria tem 12V e capacidade de armazenamento de carga de 36A. O motor elétrico tem potência de 350W e é capaz de rodar com operadores de até 150kg. A central de comando controla todos os componentes. O *kit* elétrico foi instalado com o objetivo de auxiliar na constância da velocidade durante a realização dos ensaios e ajudar o operador do equipamento de modo que seja reduzido seu esforço físico. A Figura 22 apresenta os componentes do equipamento acoplado à bicicleta.

Figura 22 - Componentes na Bicicleta.



Fonte: Elaborada pelo autor

Os números indicam, respectivamente:

1 → Potenciômetro;

2 → LED;

3 → Módulo de aceleração (Acelerômetro);

4 → Arduino;

5 → Fonte de alimentação elétrica (bateria externa com saída de 5V e corrente de até 1A);

Quando alimentado eletricamente, o microcontrolador arduino ficava recebendo, de modo constante, as informações obtidas pelo acelerômetro. O potenciômetro é o dispositivo que inicia e para o processo de gravação dos dados de aceleração no cartão de memória conectado ao arduino. O LED de cor verde tem a função de sinalizar quando os dados estão sendo gravados no cartão de memória. Se o LED estivesse aceso é porque os dados estavam sendo gravados.

### 3.4 Dados do Levantamento do Trecho

O trecho escolhido é constituído de 320m de pavimento flexível do *Campus* do Pici da Universidade Federal do Ceará. Trata-se de um pavimento de duas faixas localizado próximo aos laboratórios do curso de Zootecnia, mais especificamente, o de criação de caprinos. Esse trecho foi escolhido por ser um dos revestidos com concreto asfáltico do *Campus*. A Figura 23 destaca o referido trecho.

Figura 23 – Localização do levantamento topográfico



Fonte: Google Earth (2016)

Os números indicam, respectivamente:

1 → Início

2 → Final

Para a análise dos resultados, será designado como Ida o sentido de início para o final e como Volta o sentido do final para o início.

### **3.5 O levantamento do Perfil do Trecho Experimental**

O levantamento do perfil longitudinal do trecho experimental foi realizado pelo método estático utilizando-se nível e mira. Esse levantamento foi orientado pelas especificações de DNER (1986).

De acordo com esta norma, o estaqueamento longitudinal da pista deve ser realizado sobre as trilhas de rodas externas e internas. A pista na qual foi feito o levantamento com nível e mira está localizada no *Campus* do Pici da Universidade Federal do Ceará e apresenta faixa de tráfego com largura de 3,5m. Nesse caso, conforme DNER (1986), para faixas de tráfego com essa especificação, o alinhamento externo está a 0,9m meio-fio.

No entanto, para esta pesquisa, o levantamento foi realizado somente no alinhamento externo, pois a bicicleta só passa em uma trilha de roda por vez. Além disso, o objetivo da pesquisa está relacionado ao potencial do equipamento de obter o perfil longitudinal e avaliar irregularidade superficial do pavimento e não ao cálculo do IRI. As estacas de número inteiro são distanciadas entre si de 5,0m e as estacas intermediárias distanciadas entre si de 0,5m.

De acordo com DNER (1986), para a medição de irregularidade na superfície de um pavimento, os levantamentos devem ser realizados a cada 320m com estaqueamento de 0,5m. Isso totalizou 641 pontos por trecho levantado.

O levantamento do perfil longitudinal foi feito entre os dias 02 e 09 de setembro de 2016. Durante a tarde do dia 02 de setembro, foram realizadas as marcações a cada 0,50m na superfície do pavimento com o auxílio de um gabarito de 0,50m (distância entre os pontos) x 0,90 (distância do meio fio), conforme a Figura 24.

Figura 24 - Marcação dos pontos na superfície do pavimento



Fonte: Elaborada pelo autor

Os números indicam, respectivamente:

1 → Marcações na superfície do pavimento;

2 → Gabarito para auxiliar nas marcações.

Este procedimento foi realizado durante as tardes dos dias 07, 08 e 09 de setembro de 2016. A etapa de marcação foi executada por duas pessoas e a de levantamento, por três pessoas: uma para segurar o nível, uma para fazer as leituras na mira e outra para fazer as anotações. A Figura 25 apresenta imagens do levantamento feito pelo método nível e mira.

Figura 25 – Levantamento realizado pelo método nível e mira



Fonte: Elaborada pelo autor

Os números indicam, respectivamente:

1 → Equipe de levantamento operando a mira ;

2 → Marcações do estakeamento intermediário

O levantamento foi iniciado pelas marcações na pista para facilitar o posicionamento da mira. A Figura 26 apresenta um trecho da pista do pavimento flexível com as marcações.

Figura 26 – Superfície do Pavimento e o tipo de veículo que trafega



Fonte: Elaborada pelo autor

Os números indicam, respectivamente:

- 1 → Tipo veículo que trafega no trecho experimental
- 2 → Marcações do estaqueamento intermediário

A Figura 27 apresenta o nível digital DL-201, da marca Ruide, utilizado para fazer o levantamento topográfico em campo. Esse equipamento foi cedido pelo Laboratório de Geomática Aplicada (LAG) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Figura 27 - Nível Digital DL-201



Fonte: Elaborada pelo autor

De acordo com Ruide (2016), a precisão altimétrica deste nível, ou seja, o desvio padrão a cada 1km, é de 1,0mm se for feita uma leitura digital. DNER (1986) estabelece que a precisão deve ser de até 1,5mm/km. O equipamento também fornece a distância linear até a mira. Se essa distância D for inferior a 10m, a precisão será de 10mm. Se a distância D for maior que 10m, a precisão será de  $D \times 0,001$ . O alcance de leitura é de 1,5m a 105m. O tempo de medição, em condições normais, é de 3 segundos. A acurácia do nível de bolha é de  $8''/2\text{mm}$ . O referido nível foi projetado para trabalhar com temperatura de 20° a 50°.

As Figura 28 e 29 apresentam a mira utilizada no levantamento topográfico. DNER (1986) estabelece que a mira utilizada para nivelamento deve ter comprimento de 2m a 4m graduada em divisões de, pelo menos, meio centímetro (0,5cm) e que permita a leitura em milímetros por interpolação. A régua utilizada no levantamento do trecho experimental atende a todos os requisitos.

As restrições encontradas durante o levantamento, além do calor intenso e das chuvas, foi que o trecho não foi isolado para a realização do trabalho. Dessa forma, havia o risco de acidente devido ao tráfego de veículos no trecho experimental.

Figura 28 –



Figura 29 –



Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.6 Sobre os ensaios de validação

Foram realizados ensaios em diferentes trajetórias. Inicialmente em laboratório, com garfo escocês e carrinho sobre trilho de ar, e, por fim, em um trecho experimental auxiliado por uma bicicleta. No garfo escocês, variou-se a frequência de oscilação e no trecho variou-se a velocidade e o sentido de cada passada.

Foram realizados 87 ensaios com o acelerômetro, sendo 24 utilizando-se um garfo escocês em três repetições para cada uma das oito frequências disponíveis no torno mecânico, 10 no carrinho sobre um trilho de ar do Laboratório de Física Experimental da UFC e 53 com a bicicleta.

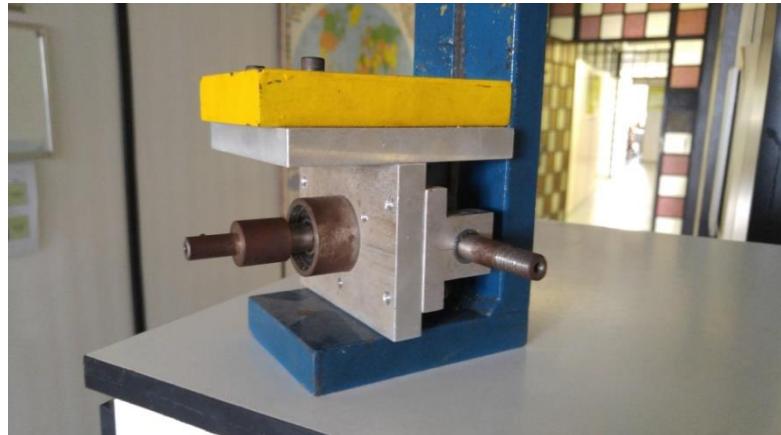
Foi realizada uma busca exaustiva na literatura por trabalhos correlatos ao desta pesquisa e não foi encontrado nenhum que sugerisse uma metodologia em relação aos ensaios. Dessa forma, a quantidade de ensaios em cada experimento foi definida arbitrariamente pelo autor dessa pesquisa e, pela análise dos resultados, foi possível perceber que a quantidade de ensaios foi suficiente para atingir os objetivos propostos.

#### 3.6.1 No garfo escocês

Garfo escocês é um mecanismo possui a capacidade de gerar um movimento de saída que tem as características de um movimento harmônico simples, no caso uma senóide. Por este motivo, o garfo foi escolhido para aferir o acelerômetro, haja vista que os dados obtidos pelo sensor deveriam corresponder a trajetória definida pelo eixo do garfo escocês.

As Figura 30 a 32 mostram, respectivamente, o garfo escocês, o adaptador feito para encaixar o acelerômetro no garfo e o acelerômetro fixado no garfo.

Figura 30 – Garfo Escocês

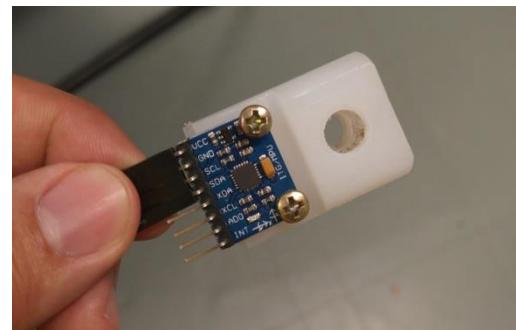


Fonte: Elaborada pelo autor

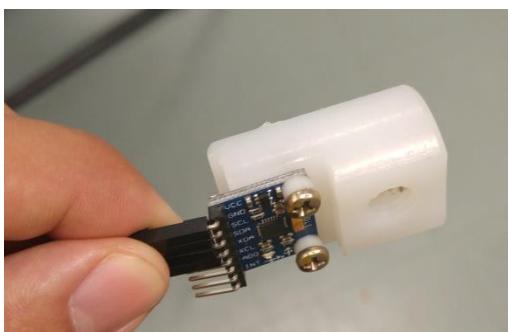
Figura 31 – Adaptador do Acelerômetro



(a)



(b)



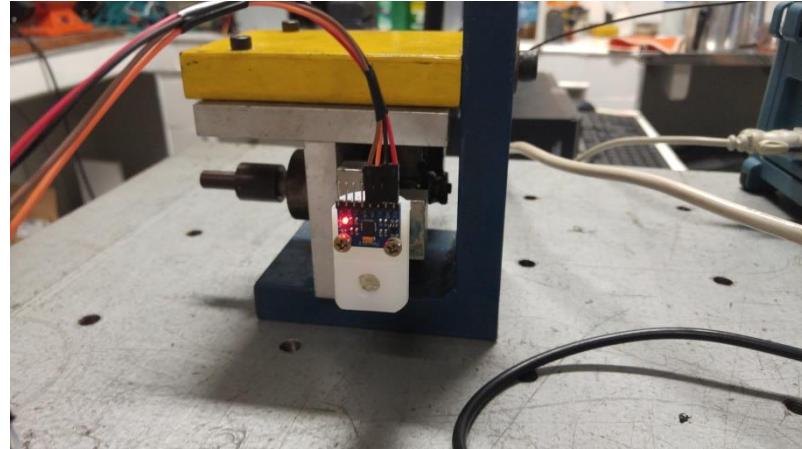
(c)



(d)

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 32 - Acelerômetro no Garfo Escocês

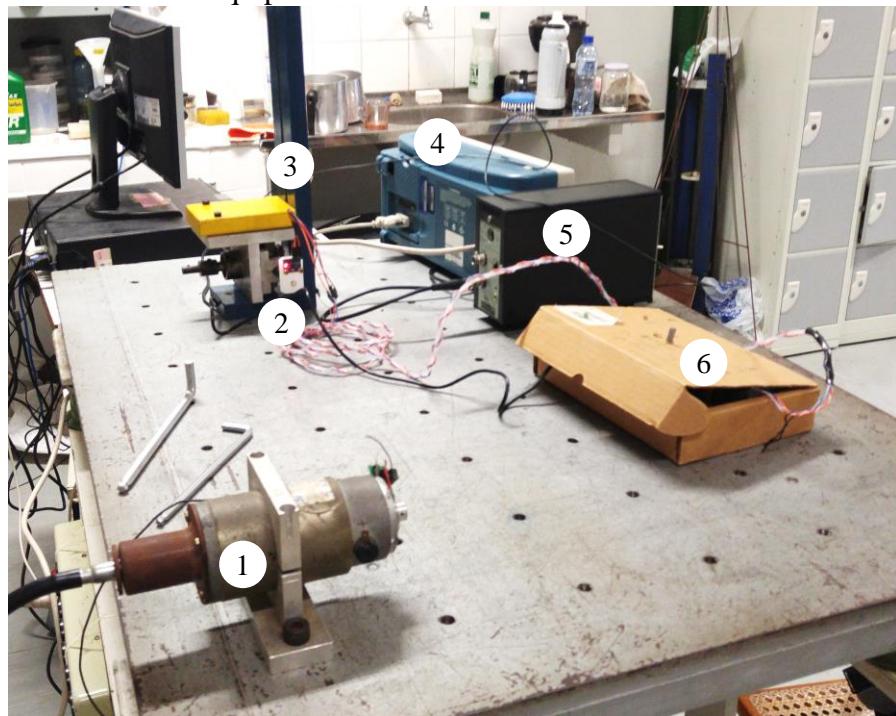


Fonte: Elaborada pelo autor

Devido ao fato de o garfo escocês realizar uma trajetória conhecida, esse equipamento foi escolhido com o objetivo inicial de se aferir o acelerômetro. O eixo do garfo oscila em uma única direção e com amplitude previamente estabelecida. Nessa situação, implementar-se-ia um algoritmo para o processamento dos dados de modo mais objetivo, pois a saída esperada seria, teoricamente, uma senóide.

Na primeira parte dos ensaios com o garfo escocês, utilizou-se um motor de bancada para movimentar o garfo. As Figura 33 e 34 apresentam a bancada e seus equipamentos.

Figura 33 – Bancada e seus equipamentos

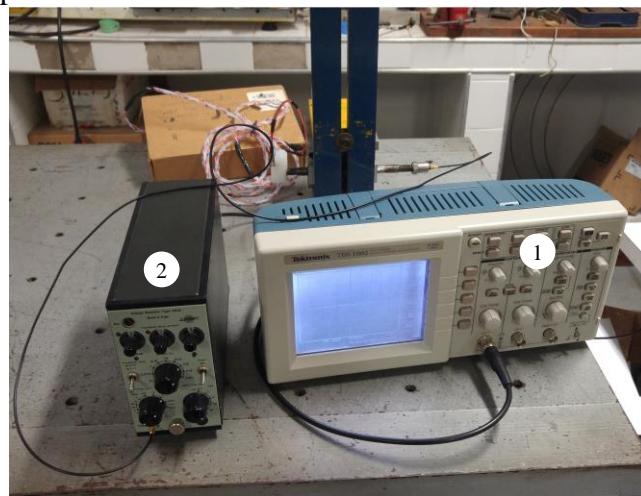


Fonte: Elaborada pelo autor

Os números indicam, respectivamente:

- 1 → Motor responsável pelo movimento do garfo escocês;
- 2 → Acelerômetro;
- 3 → Garfo escocês;
- 4 → Osciloscópio;
- 5 → Conversor de dados ;
- 6 → Case do acelerômetro com o potenciômetro.

Figura 34 - Osciloscópio e conversor de dados



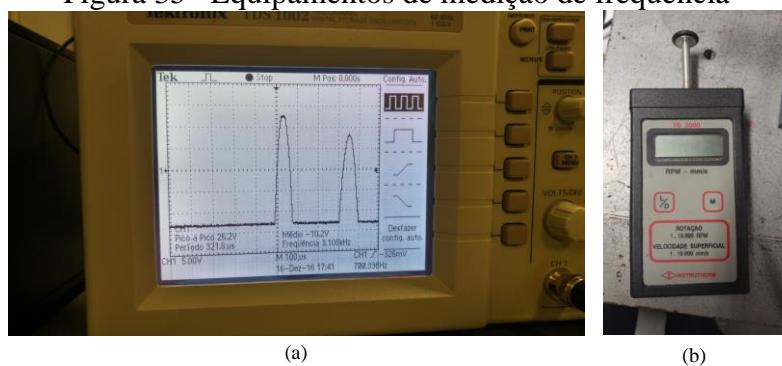
Fonte: Elaborada pelo autor

Os números indicam, respectivamente:

- 1 → Osciloscópio;
- 2 → Conversor de dados.

O osciloscópio é um equipamento que exibe em uma tela o comportamento de um determinado sinal digital ou analógico. O tacômetro é um equipamento que conta giros. A Figura 35 apresenta o osciloscópio (a) e o tacômetro (b).

Figura 35– Equipamentos de medição de frequência

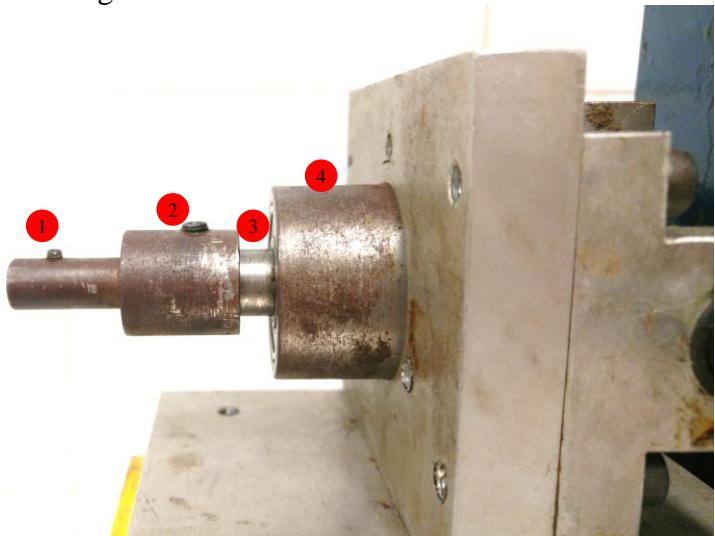


Fonte: Elaborada pelo autor

A fonte de alimentação elétrica, cuja tensão de saída era ajustável, acionava o motor. Assim, a frequência da rotação do motor variava conforme a tensão de saída da fonte. Nessa configuração, o sistema que movimentava o garfo (fonte elétrica → motor → garfo), não permitia a configuração da frequência de oscilação do eixo do garfo escocês, mas somente a tensão de saída da fonte que alimentava o motor. No entanto, uma determinada tensão nem sempre gerava uma mesma rotação do motor. Assim, o tacômetro se fez necessário para verificar as rotações do motor da bancada.

O resultado da oscilação do garfo escocês era exibido no osciloscópio e a frequência do movimento era acompanhada por um tacômetro. A escolha dos resultados obtidos pela medição dos diferentes diâmetros do garfo escocês (Figura 36) gerou incertezas sobre qual seria o diâmetro adequado para fins de medição da frequência de funcionamento do garfo a ser utilizada.

Figura 36 - Diferentes diâmetros do garfo escocês



Fonte: Elaborada pelo autor

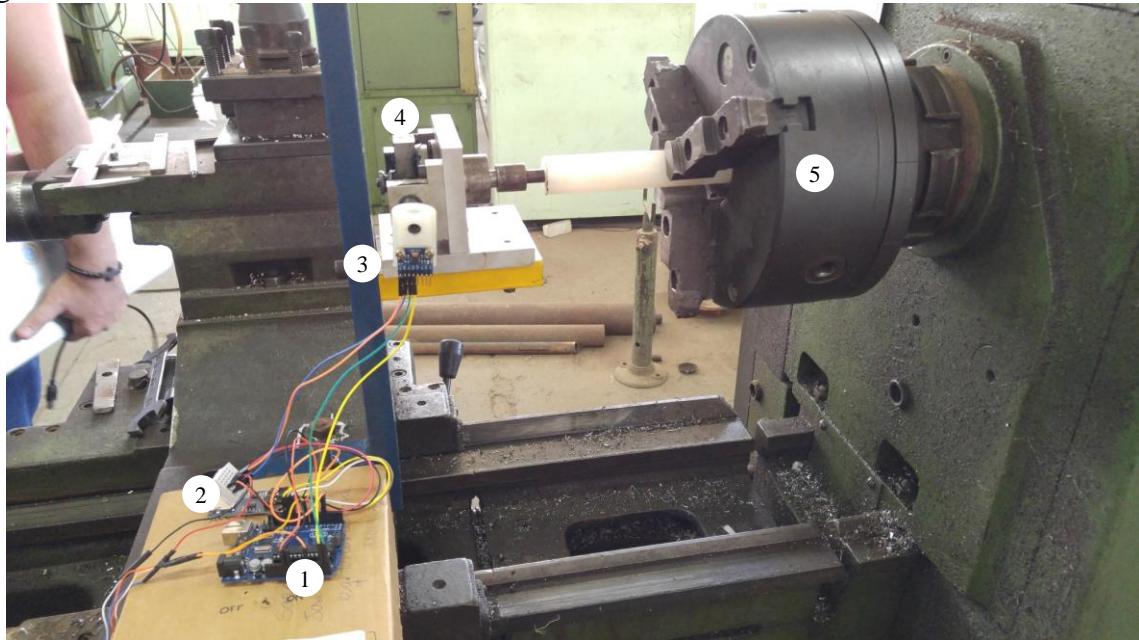
Os números indicam, respectivamente:

- 1 → Diâmetro de 7mm;
- 2 → Diâmetro de 18mm;
- 3 → Diâmetro de 11mm;
- 4 → Diâmetro de 33mm.

Em função das incertezas geradas, este ensaio foi realizado em um torno mecânico, pois, neste equipamento, era possível configurar as frequências de oscilação do

eixo do garfo escocês. Os ensaios foram realizados com as frequências de 0,93Hz, 1,33Hz, 2,08Hz, 4,17Hz, 5,92Hz, 8,33Hz, 11,83Hz e 16,67Hz. Essas eram as frequências pré-definidas no torno mecânico. Para cada uma dessas frequências, o ensaio foi repetido três vezes e todos com duração de 30 segundos. A Figura 37 mostra o acelerômetro no torno mecânico.

Figura 37 – Acelerômetro no torno mecânico



Fonte: Elaborada pelo autor

Os números indicam, respectivamente:

- 1 → Arduino;
- 2 → Potenciômetro;
- 3 → Acelerômetro;
- 4 → Garfo escocês;
- 5 → Torno mecânico.

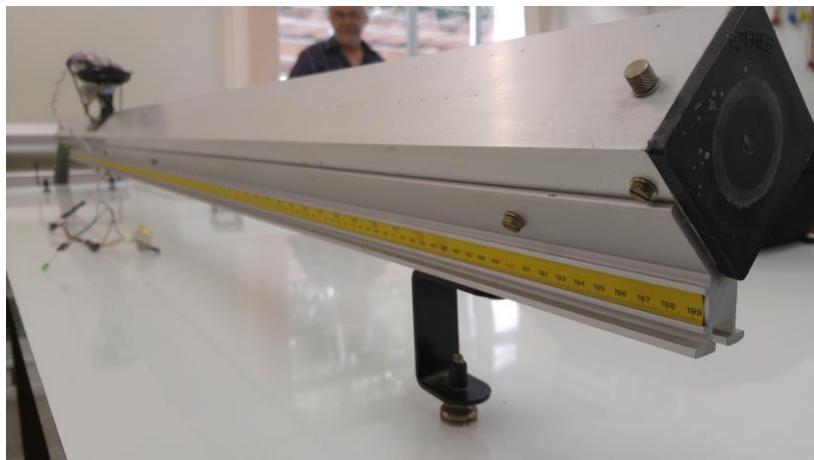
O ensaio no torno mecânico foi realizado em frequências distintas para se analisar o comportamento do sinal de aceleração em cada uma das frequências. Nesse caso, a amplitude e as respectivas frequências de oscilação do garfo também eram conhecidas. Tanto no torno mecânico como no motor de bancada, a taxa de aquisição dos dados de aceleração foi de 90Hz.

### **3.6.2 No carrinho do trilho de ar**

Um trilho de ar consiste em uma régua de alumínio de seção transversal quadrada com furos por todas as superfícies pelas quais o carrinho trafega. A fonte de ar é um equipamento semelhante um aspirador de pó que injeta ar no interior da régua.

A escolha desse equipamento deveu-se ao fato de se tratar de uma trajetória plana, horizontal e sem curvas, com comprimento conhecido e em um percurso com o mínimo de ruído, pois, teoricamente, não tem atrito. De fato, o carrinho andava numa velocidade, aproximadamente, constante e livremente no trilho durante os ensaios. A Figura 38 mostra o trilho de ar.

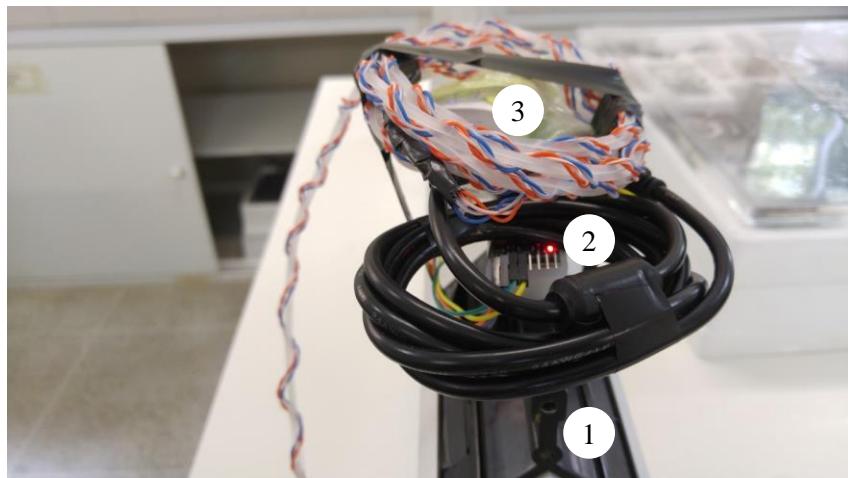
Figura 38 – Trilho de Ar



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 39 mostra o ensaio realizado no Laboratório de Física Experimental da Universidade Federal do Ceará. Trata-se de um carrinho em um trilho de ar. O trilho tem comprimento de 2m e acelerômetro estava acoplado no carrinho.

Figura 39 – Acelerômetro do Trilho de Ar



Fonte: Elaborada pelo autor

Os números indicam, respectivamente:

- 1 → Carrinho do trilho de ar;
- 2 → Acelerômetro;
- 3 → Fonte de alimentação elétrica.

### 3.6.3 Na bicicleta

Os ensaios com velocidade de 25Km/h foram realizados na tarde do dia 14 de março de 2017. Os demais ensaios ocorreram no dia no período da tarde do dia 21 de março de 2017. Nos ensaios realizados utilizando-se a bicicleta, variou-se a velocidade, o sentido das passadas e a taxa de obtenção de dados. O objetivo de se variar a velocidade, o sentido das passadas no trecho a taxa de aquisição dos dados era de se ter mais cenários para a análise dos dados de aceleração vertical obtidos pelo acelerômetro. Todos os ensaios foram realizados somente com esta bicicleta. Como mencionado anteriormente, o tipo de bicicleta e a quantidade e sentido dos ensaios foram definidos arbitrariamente pelo autor deste trabalho, pois não foram encontrados trabalhos relacionados que definissem uma metodologia para este tipo de ensaio.

As velocidades e as respectivas quantidades de passadas no trecho experimental e a taxa de obtenção de dados estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Ensaios com a bicicleta no trecho experimental

Velocidade (km/h)	Nº de Passadas	Frequência
5	11	50Hz
10 (Susp. Destrav.)	4	50Hz
10 (Susp. Trav.)	10	50Hz
15	10	50Hz
20	8	50Hz
25	10	100Hz

Fonte: O Autor

O sensor de aceleração foi posicionado em um local considerado o final da suspensão. Esse ponto foi escolhido porque todos os movimentos do pneu frontal da bicicleta são transmitidos para a suspensão travada e passam da suspensão para o acelerômetro. É possível perceber que a posição do sensor interfere nos valores de aceleração dos eixos do acelerômetro, pois os valores de aceleração mudam conforme a posição do sensor. Devido a

isso, antes de fixar o acelerômetro, em todos os ensaios realizados na bicicleta, nivelou-se o sensor na horizontal com o auxílio de um nível de bolha, conforme a Figura 40. Apesar de a bicicleta não se manter constantemente nivelada durante o ensaio, essa é uma solução adotada para amenizar o efeito do desnívelamento do módulo de aceleração durante a movimentação da bicicleta.

Figura 40 – Nivelamento do Sensor



Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.7 Processamento dos dados

Os sinais contendo os dados de aceleração vertical de todos os ensaios foram armazenados no cartão de memória do protótipo. Conforme a documentação do módulo de aceleração, esses dados foram obtidos em valores múltiplos de 16384.

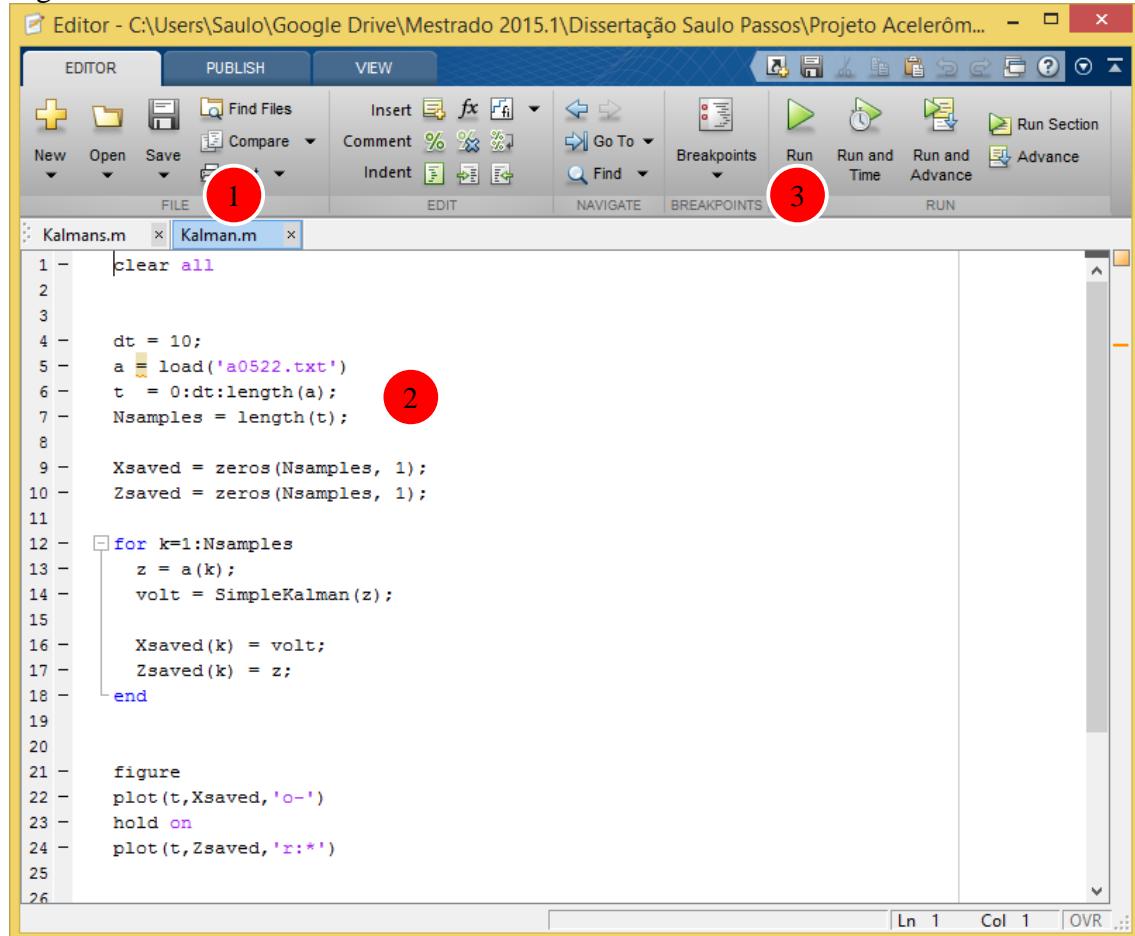
Ao dividir os valores pela constante citada no parágrafo anterior, obtém-se o valor da aceleração estática, ou seja, o valor da aceleração da gravidade. Após a divisão, os valores ficaram em torno de número um (1), referente a 1G ( $9,81\text{m/s}^2$ ) e variaram de -2G a 2G nos ensaios com o garfo escocês.

Apesar o arduino ser capaz para processar os dados gerados pelo módulo de aceleração, o processamento foi executado em um computador do tipo *desktop* por ter maior capacidade de processamento e uma interface gráfica mais intuitiva. Todos os dados de aceleração do acelerômetro foram convertidos em valores múltiplos da aceleração da gravidade no *software* Microsoft Excel.

Os dados convertidos foram então exportados para um arquivo de texto, pois seriam mais facilmente exportados para o *software* Matlab (*Matrix Laboratory*), programa indicado para cálculos numéricos. Esse *software* é capaz de fazer análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos. Por isso foi escolhido como

ferramenta da presente pesquisa. A Figura 41 apresenta uma interface do *software* Matlab e uma parte do filtro de Kalman utilizado no processamento dos dados.

Figura 41 – Interface do Matlab



Fonte: Elaborada pelo autor

Os números indicam, respectivamente:

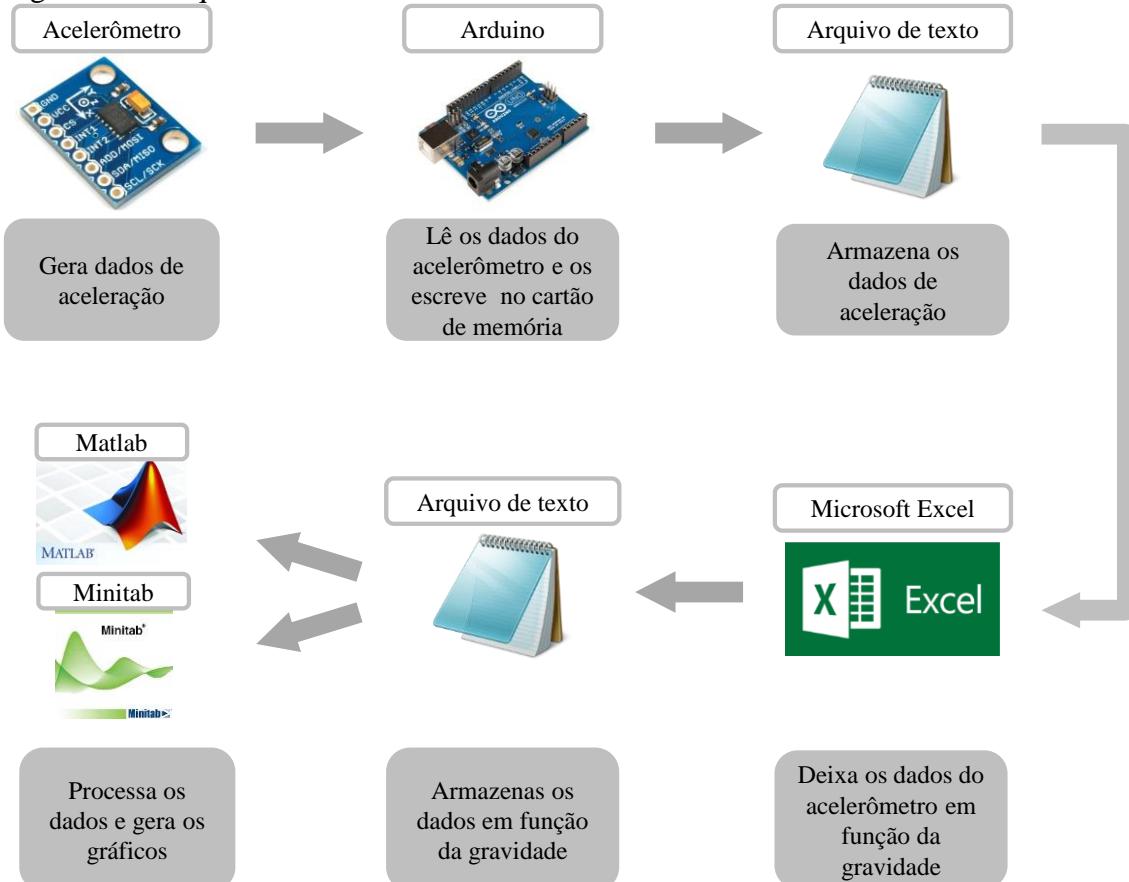
1 → Documentos abertos;

2 → Espaço de trabalho (*workspace*) com o código utilizado para o tratamento dos dados;

3 → Botão *Run*, cuja função é executar o código.

A Figura 42 apresenta o esquema utilizado para o processamento dos dados.

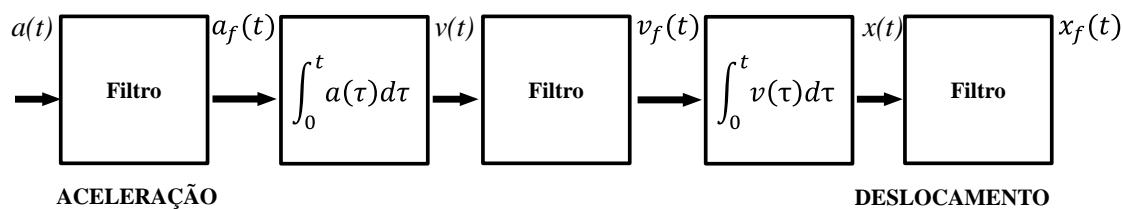
Figura 42 – Esquema do Processamento de dados



Fonte: Elaborada pelo autor

Segundo Slifka (2004), os dados de aceleração vertical são convertidos em deslocamento através de dupla integração matemática e pela utilização de filtros digitais para retirar os ruídos do sinal. A Figura 43 apresenta o esquema sugerido.

Figura 43 – Bloco de Processamento de Dados



Fonte: Adaptado de Slifka (2004).

Para se realizar a análise dos dados com o objetivo de avaliar o potencial do equipamento para obter o perfil longitudinal, foram utilizados somente os filtros, no caso o filtro de Kalman e média móvel. Como descrito nos capítulos anteriores, o filtro de Kalman funciona como um estimador de estado de um dado corpo, o que será observado no capítulo referente à análise dos dados.

Para validar os resultados obtidos pelo filtro de Kalman, os dados de 43 ensaios realizados com a bicicleta foram processados por outro filtro digital, o média móvel, com janela de tamanho igual a 100 posições. Nesse caso, cada dado pós-filtro média móvel corresponderá à média aritmética dele mesmo e dos 99 dados seguintes.

Para analisar os dados em relação ao potencial de se obter dados de irregularidade longitudinal, no *software* Microsoft Excel, segmentaram-se os dados de cada 5m do trecho experimental. Obteve-se daí 64 amostras de dados de aceleração vertical. Logicamente, 5m medidos a velocidade de 5Km/h vai apresentar maior quantidade de dados que os medidos a 25km/h, pois em velocidades menores, o tempo de duração para percorrer um dado trecho é maior e o acelerômetro obtém mais dados. Após essa divisão dos dados correspondente a cada 5m do trecho, foi calculada para cada um dos segmentos a média aritmética, desvio padrão e o coeficiente de variação, que é relação entre desvio padrão e a média. A Figura 44 apresenta uma parte de uma das planilhas na qual foi realizado esse procedimento.

Na Figura 44, os valores da coluna “DADOS DE ACELERAÇÃO” são os dados de aceleração obtidos pelo acelerômetro. Conforme mencionado anteriormente, os valores são múltiplos de 16384. Os números da coluna DISTÂNCIA referem-se aos segmentos de 5m. A primeira coluna (número de linha) dessa planilha apresenta intervalos entre uma linha e outra de 157 posições. Isso significa que, nessa planilha especificamente, a cada 5m percorridos foram obtidos 157 dados de aceleração.

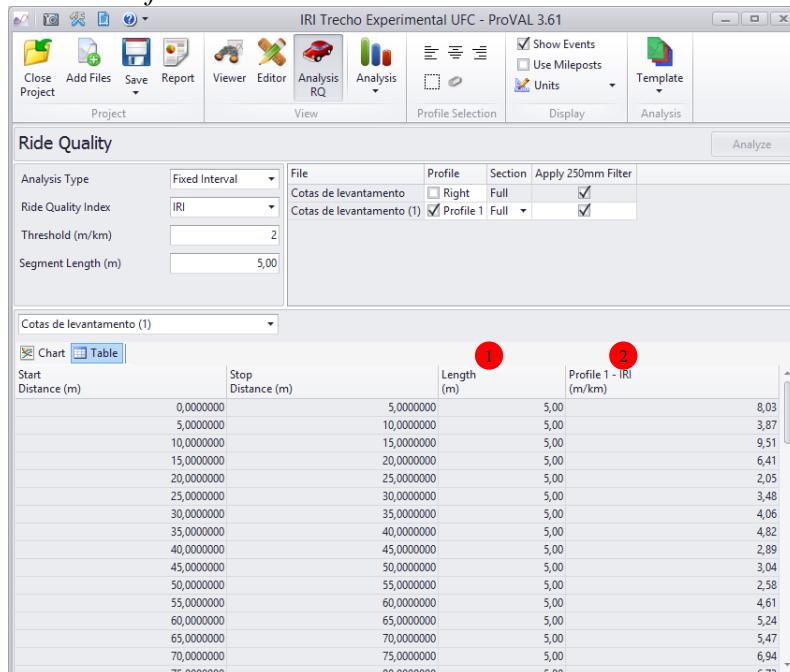
Foi executada, então, uma regressão linear simples entre os coeficientes de variação e os dados de IRI calculados pelo *software* ProVal (*Profile Viewing and Analysis*) do trecho experimental (320m) a cada 5m. Os dados de entrada do ProVal foram os dados do levantamento realizado no trecho experimental por nível e mira. A Figura 45 apresenta uma interface do ProVal com os dados do levantamento realizado por nível e mira e os dados de IRI calculados a cada 5m.

Figura 44 – Segmentação dos dados de aceleração vertical

	DADOS DE ACELERAÇÃO	DISTÂNCIA PERCORRIDAS	MÉDIA ARITMÉTICA	DESVIO PADRÃO	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO
2					
3					
4	15216	0	16389,06329	905,5389	5,53%
161	17600	5,008973081	16376,58228	820,08877	5,01%
318	16104	10,01794616	16362,63291	832,76603	5,09%
475	17024	15,02691924	16397,62025	695,01593	4,24%
631	17144	20,00398804	16380,53165	566,70438	3,46%
788	15776	25,01296112	16368,60759	496,48018	3,03%
945	16896	30,0219342	16379,97468	530,48105	3,24%
1102	16332	35,03090728	16398,50633	615,54694	3,75%
1258	16648	40,00797607	16340,22785	679,10338	4,16%
1415	16668	45,01694915	16369,79747	760,48051	4,65%
1572	16068	50,02592223	16362,20253	762,86908	4,66%
1728	16216	55,00299103	16324,78481	938,46846	5,75%
1885	17156	60,01196411	16256,58228	981,49303	6,04%
2042	17304	65,02093719	16294,93671	1020,3807	6,26%
2199	16256	70,02991027	16391,13924	1007,9951	6,15%
2355	15912	75,00697906	16281,79747	721,74319	4,43%
2512	16696	80,01595214	16378,35443	636,64537	3,89%
2669	14660	85,02492522	16290,43038	773,57963	4,75%
2825	16328	90,00199402	16340,43038	969,93097	5,94%
2982	16008	95,0109671	16256,50633	904,99497	5,57%
3139	17524	100,0199402	16312,86076	871,27128	5,34%
3296	15740	105,0289133	16290,73418	900,40196	5,53%
3452	15768	110,0059821	16262,81013	857,50419	5,27%
3609	17436	115,0149551	16321,59494	694,9948	4,26%
3766	16784	120,0239282	16334,3038	838,58933	5,13%
3922	16148	125,000997	16296,81013	820,80386	5,04%
4079	15772	130,0099701	16228,4557	724,01091	4,46%
4236	16312	135,0189432	16297,8481	568,49922	3,49%
4393	15740	140,0279163	16274,27848	579,63298	3,56%
4549	14488	145,004985	16210,1519	622,8357	3,84%
4706	16856	150,0139581	16306,63291	724,38942	4,44%
4863	15960	155,0229312	16329,8481	713,83027	4,37%
5019	16916	160	16267,08861	728,70043	4,48%
5176	17120	165,0089731	16267,44304	1339,9023	8,23%
5333	15776	170,0179462			
5490	17168	175,0269192			

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 45 – Interface do Software ProVal



Fonte: Elaborada pelo autor

Os números indicam, respectivamente:

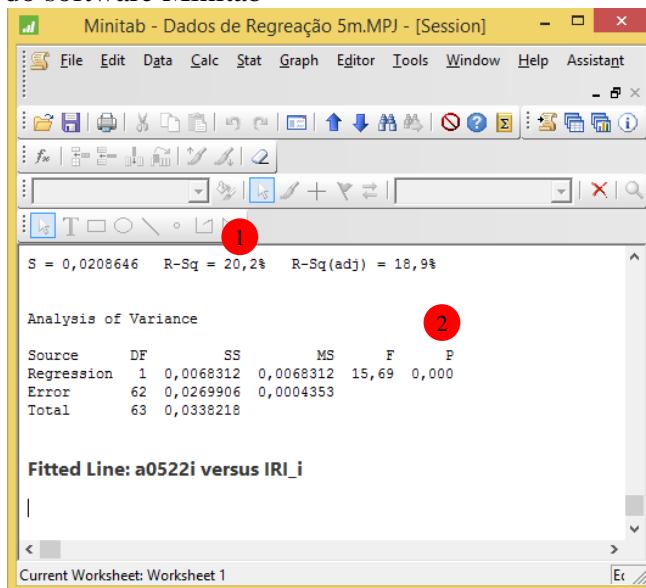
1 → Segmentos com 5m de comprimento;

2 → IRI dos respectivos segmentos;

Os resultados obtidos da regressão linear simples foram os valores de  $R^2$  e o valor do teste estatístico P. O  $R^2$  representa o quanto ajustado é um dado modelo que envolve variáveis dependentes e independentes. O teste estatístico P analisa o quanto uma variável (a independente) interfere no comportamento de outra (a dependente). Desse teste, surgem duas hipóteses, a nula e a alternativa.

A hipótese nula é a que admite que uma variável não interfere no comportamento da outra e a hipótese alternativa é a que admite que uma variável interfere no comportamento da outra. No caso desta pesquisa, a hipótese nula é a que admite que a irregularidade não interfere nos valores de aceleração vertical e a hipótese alternativa admite que os valores de aceleração vertical dependem dos valores de irregularidade. De acordo com o teste estatístico P definido com 95% de significância, se o valor do teste P for inferior a 5% (0,05), a hipótese nula pode ser descartada. Essa regressão linear simples foi realizada no software Minitab. Figura 46 apresenta a interface do Minitab e o resultado de uma regressão.

Figura 46 – Interface do software Minitab



Fonte: Elaborada pelo autor

Os números indicam, respectivamente:

1 →  $R^2$  (R-Square).

2 → Resultado do teste estatístico P.

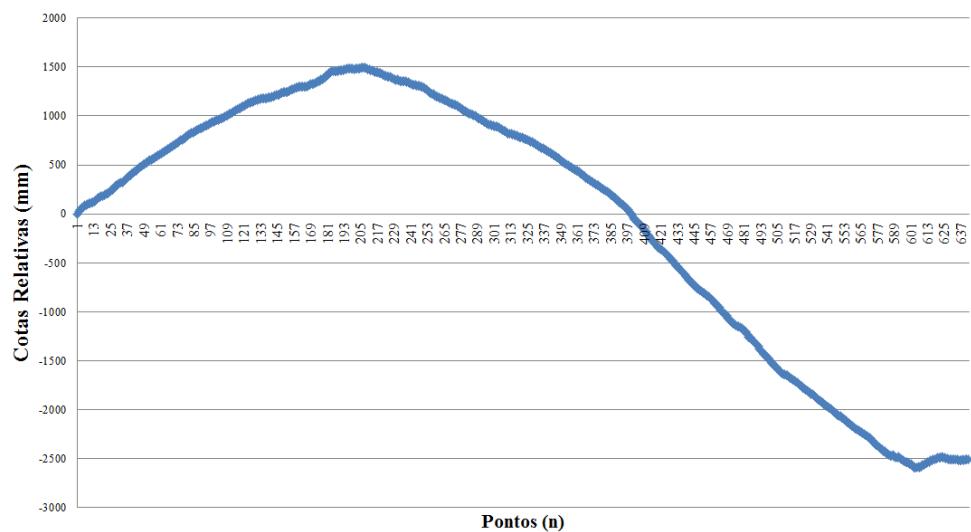
## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios realizados durante a execução da pesquisa.

### 4.1 Representação da imagem do perfil levantado com nível e mira

A Figura 47 mostra o perfil longitudinal do trecho levantado pelo método nível e mira. Na imagem, o eixo vertical está com a escala em milímetros (mm) e, no eixo horizontal, estão os 641 pontos lidos.

Figura 47 – Perfil Longitudinal do Trecho Levantado (320m - 641 pontos)



Fonte: Elaborada pelo autor

### 4.2 Sobre o trecho analisado

A Figura 48 apresenta uma imagem do trecho experimental.

Figura 48 – Trecho experimental - *Campus do Pici* (UFC)



Fonte: Elaborada pelo autor

Esse trecho, apesar de apresentar ser bem conservado, apresenta muitos defeitos, principalmente depois da metade no sentido Ida, nas proximidades das marcações feitas para o levantamento com nível e mira. É possível observar na Figura 48 que há muitas árvores próximas aos limites do pavimento e elas provocaram muitos danos ao revestimento. A Figura 49 apresenta alguns dos defeitos registrados após uma inspeção visual na superfície do pavimento.

Figura 49 - Patologias do trecho experimental



Os números indicam, respectivamente, os seguintes defeitos no pavimento:

1 → Agregado exposto

2 e 3 → Resto de argamassa de cimento *Portlant*

4 → Afundamento plástico localizado

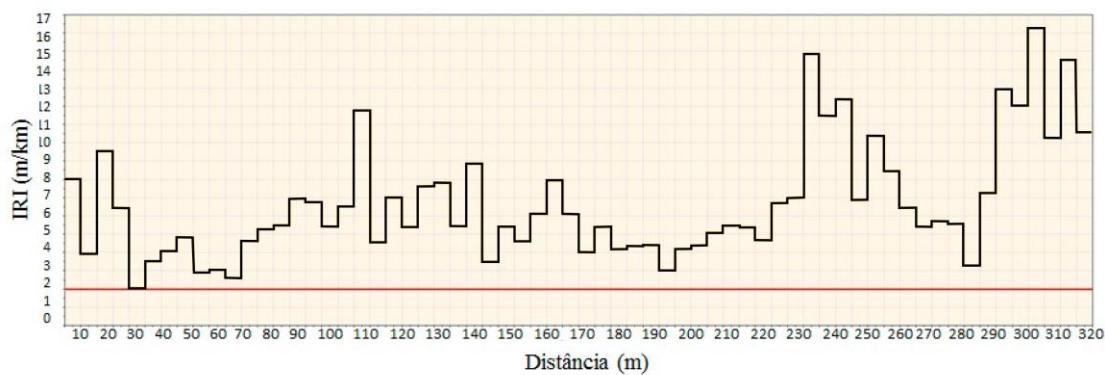
5 a 7 → Trincas provadas por raízes de árvores

8 → Ondulação provada por raízes de árvores

- 9 a 12 → Trincas provadas por raízes de árvores
- 13 e 14 → Buracos
- 15 → Afundamento com areia

A Figura 50 apresenta o gráfico referente aos valores de IRI de cada segmento de 5m obtidos ao longo dos 320m do trecho experimental medido. Esse gráfico foi gerado pelo *software* ProVal a partir dos dados do levantamento realizado pelo método nível e mira no trecho experimental.

Figura 50 – Gráfico do IRI do trecho experimental



Fonte: Elaborada pelo autor

A linha vermelha no gráfico representa o valor  $IRI = 2\text{m}/\text{km}$ , que é o valor estabelecido por Sayers e Karamihas (1998) para pavimento de auto-estradas e pistas de pouso e decolagem de aeroportos.

Pela análise do gráfico da Figura 50, é possível observar que os valores de IRI a partir de 200m do início do trecho tornam-se bem elevado. Esse fenômeno se deve às várias patologias apresentadas na Figura 49. Essa diferença na irregularidade interferiu no comportamento do acelerômetro e isso será comprovado pelos gráficos apresentados posteriormente.

#### 4.3 Análise dos resultados

Após serem tratados no programa Microsoft Excel, os dados foram submetidos à ação do filtro de Kalman, no Matlab, e do filtro média móvel, no Minitab. A seleção dos *softwares* foi baseada no conhecimento prévio do autor deste trabalho sobre o respectivo potencial de cada um. Foram escolhidos alguns dos 53 sinais de aceleração obtidos nos ensaios com a bicicleta para se gerar e analisar os gráficos com o filtro de Kalman e foram

gerados gráficos para todos os sinais de aceleração obtidos pelo uso da bicicleta filtrados pelo média móvel. O intuito de se gerar gráficos para os mesmos sinais utilizando-se algoritmos distintos foi comparar o comportamento dos dados filtrados e verificar a eficiência dos filtros utilizados. Como mencionado anteriormente, não foi encontrada na literatura uma metodologia estabelecida para os ensaios e análise de resultados. Por este motivo, a quantidade de ensaios e os métodos adotados para a análise dos resultados foram estabelecidos pelo autor desta pesquisa.

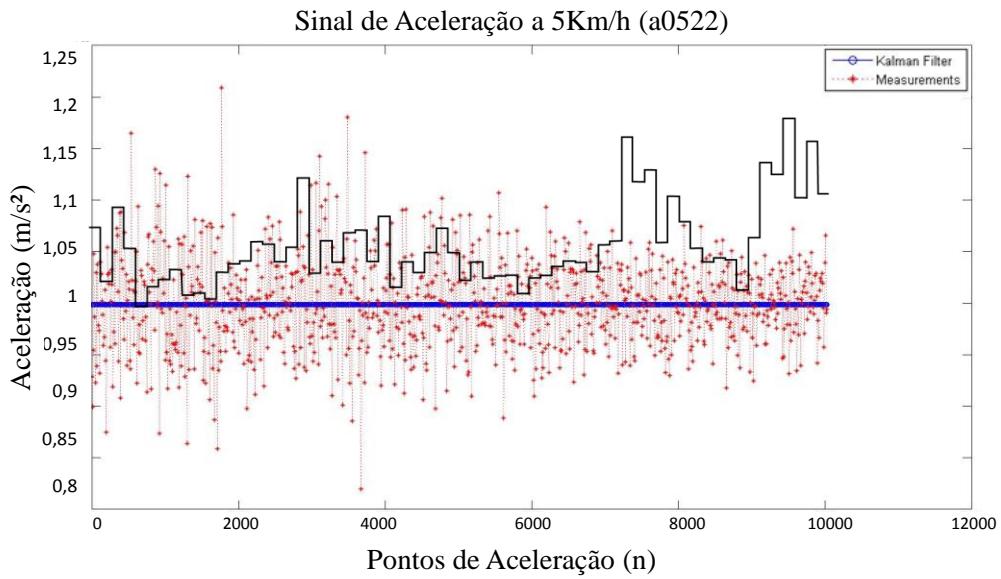
Dos ensaios realizados no garfo escocês, espera-se obter um perfil senoidal, dado que a trajetória é oscilatória de amplitude conhecida. Quanto aos ensaios realizados no trilho de ar, o perfil resultante esperado após o processamento dos dados seria uma reta plana, pois a trajetória percorrida pelo acelerômetro no carrinho era plana. A Figura 47 – Perfil Longitudinal do Trecho Levantado (320m - 641 pontos) – apresenta o resultado esperado do perfil a partir dos sinais de aceleração obtidos pelo acelerômetro nos ensaios realizados na bicicleta.

O nome dos sinais de aceleração é composto pela letra “a” (de aceleração) mais a velocidade (05, 10, 15, 20 ou 25 km/h) mais o nome do arquivo gerado pelo arduino (02 a infinito). Por exemplo, o sinal designado por a0522 corresponde ao arquivo com dados de aceleração vertical gerado em um ensaio realizado a 5Km/h e ficaram armazenados no arquivo Data22.

Os gráficos da Figura 51 a Figura 59 mostram o comportamento dos sinais de aceleração após a execução do filtro de Kalman. Em todos esses gráficos, as linhas de cor vermelha representam os sinais de aceleração a as linhas de cor azul representam o sinal de aceleração filtrado pelo filtro de Kalman.

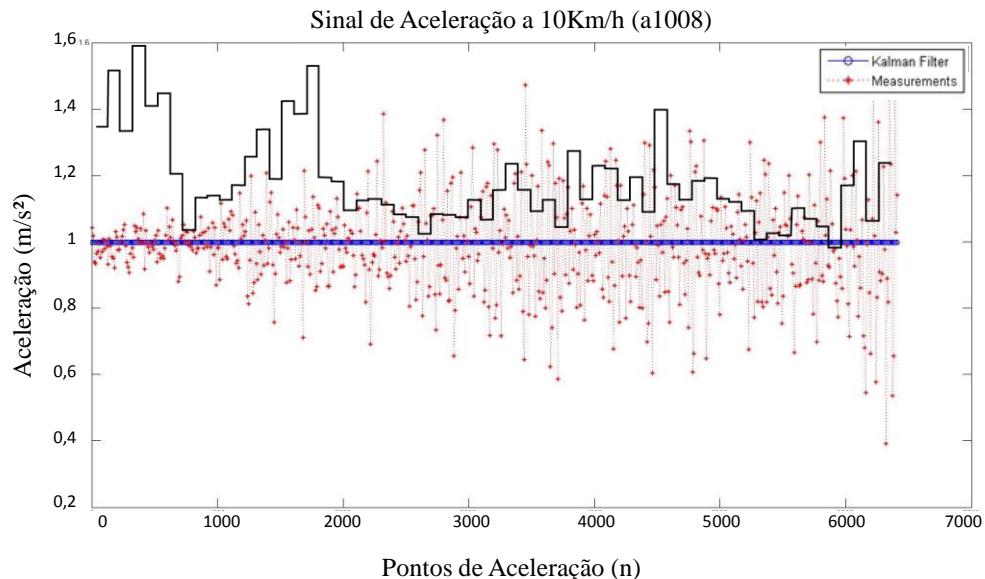
Os gráficos da Figura 61 a Figura 68 mostram os comportamento dos sinais de aceleração após a execução do filtro média móvel com janela de tamanho 100. Em todos esses gráficos, as linhas de cor azul representam os sinais de aceleração a as linhas de cor vermelha representam o sinal de aceleração filtrado pelo filtro de média móvel. Em todos os gráficos, a linha preta representa o comportamento dos valores de IRI do trecho experimental levantado pelo método nível e mira e foi sobreposta aos gráficos dos dados de aceleração para que facilitar a comparação entre o comportamento dos sinais de aceleração obtidos pelo acelerômetro e do IRI do trecho experimental.

Figura 51 – Dados de aceleração na Bicicleta a 05Km/h filtrado por filtro de Kalman (sentido Ida)



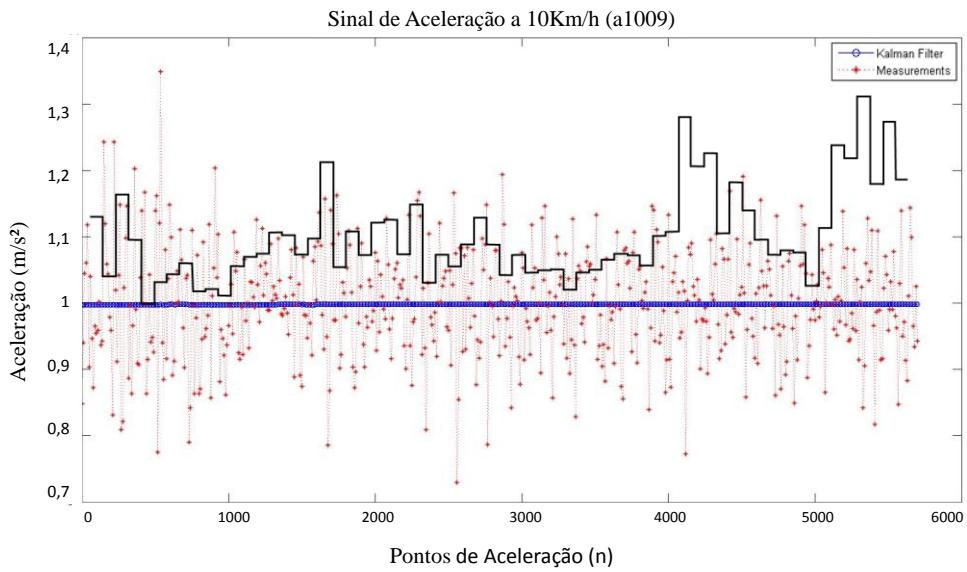
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 52 – Dados de aceleração na Bicicleta a 10Km/h filtrado por filtro de Kalman (sentido Volta)



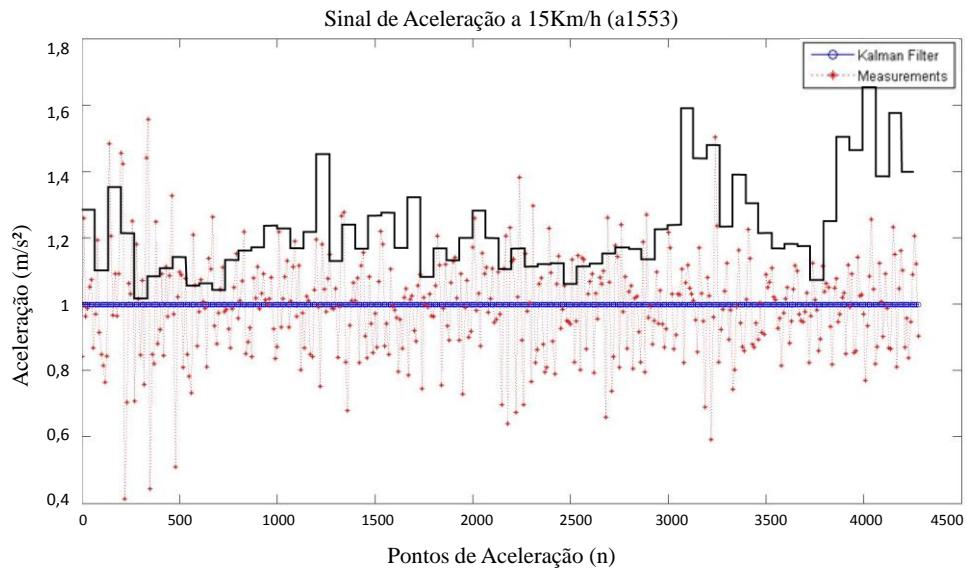
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 53 – Dados de aceleração na Bicicleta a 10Km/h filtrado por filtro de Kalman (sentido Ida)



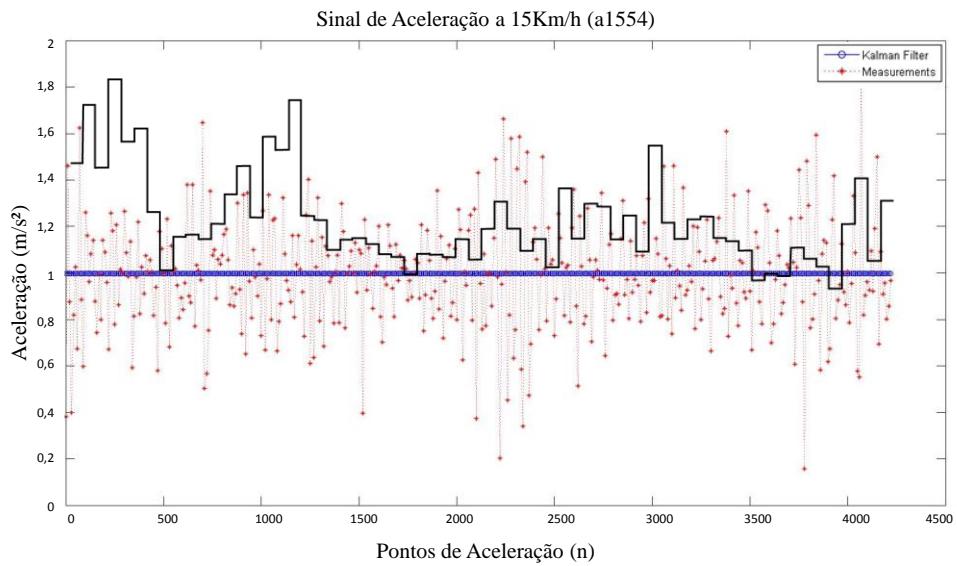
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 54 – Dados de aceleração na Bicicleta a 15Km/h filtrado por filtro de Kalman (sentido Ida)



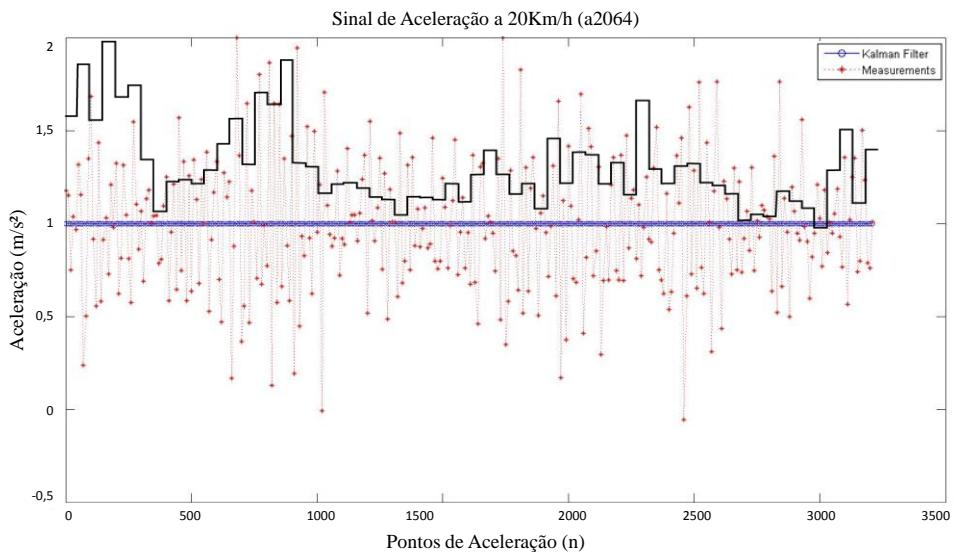
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 55 – Dados de aceleração na Bicicleta a 15Km/h filtrado por filtro de Kalman (sentido Volta)



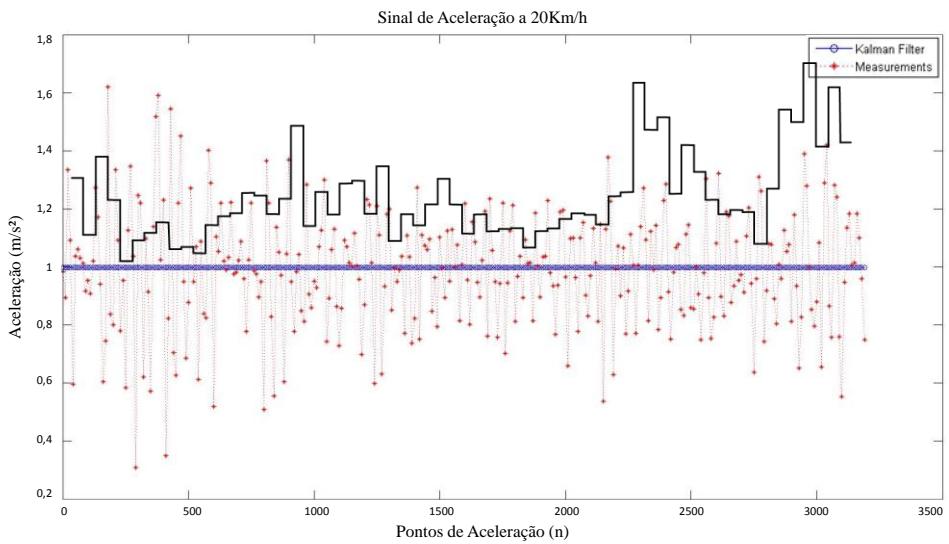
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 56 – Dados de aceleração na Bicicleta a 20Km/h filtrado por filtro de Kalman (sentido Volta)



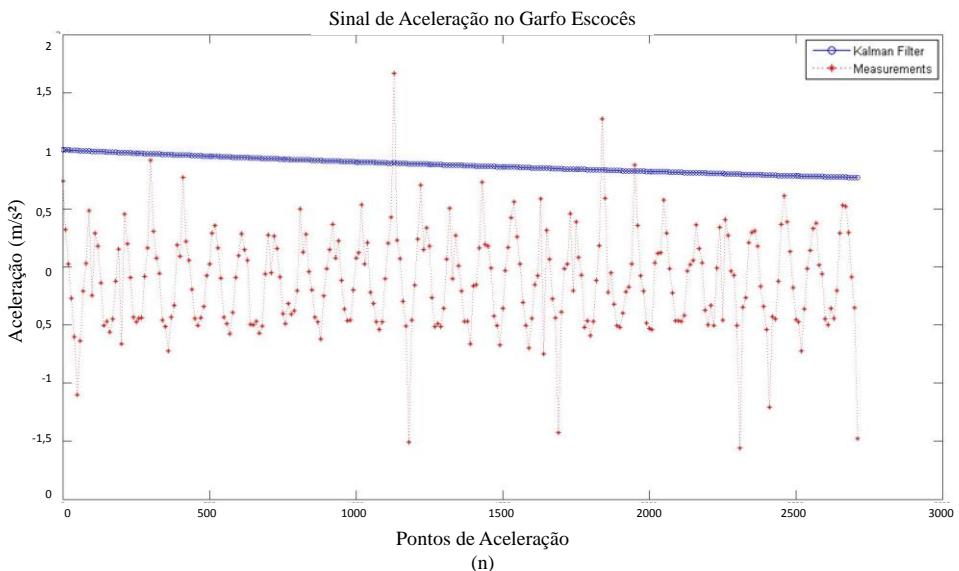
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 57 – Dados de aceleração - Bicicleta a 20Km/h filtrado por filtro de Kalman (sentido Ida)



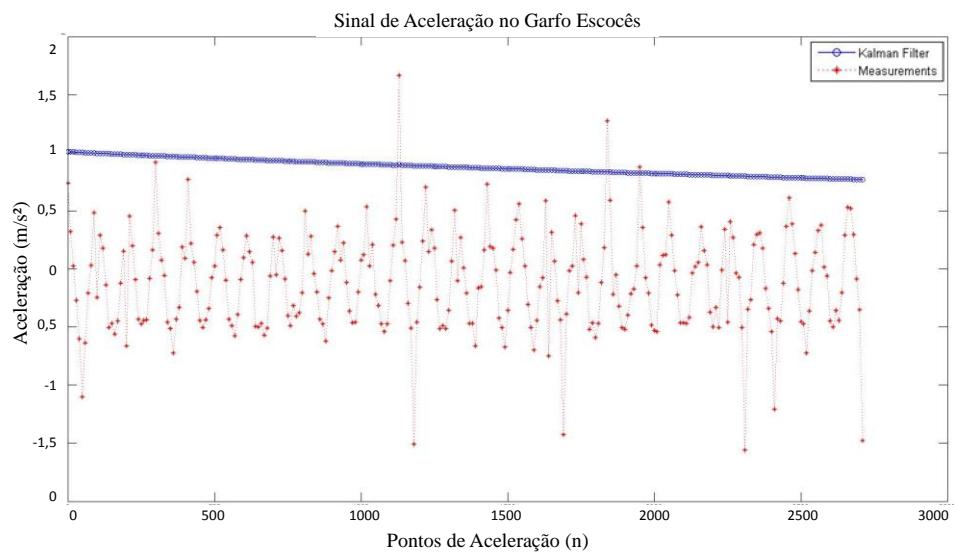
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 58 – Dados de aceleração na Garfo Escocês filtrados por filtro de Kalman



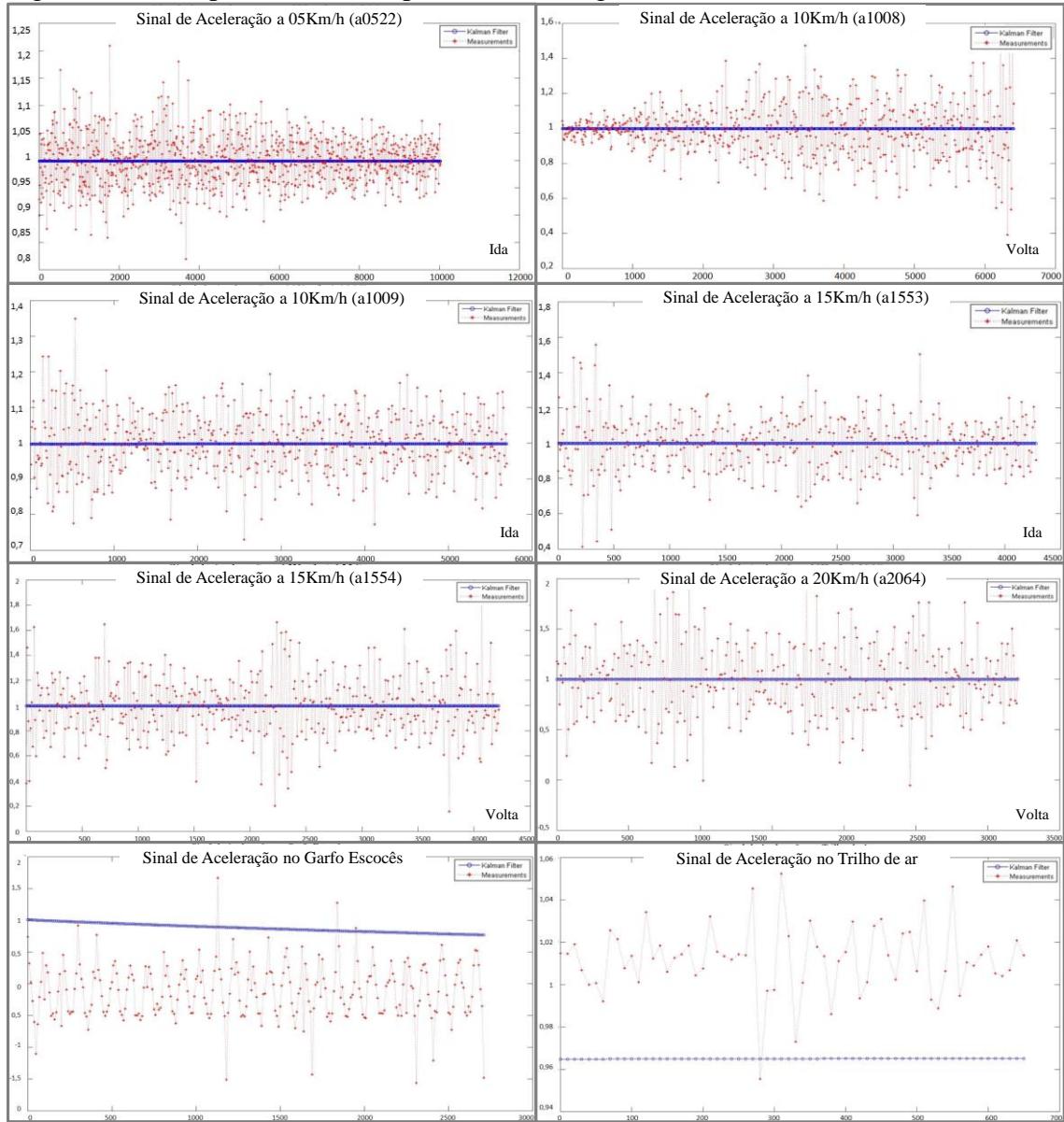
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 59 – Dados de aceleração no Trilho de Ar filtrados por filtro de Kalman



Fonte: Elaborada pelo autor

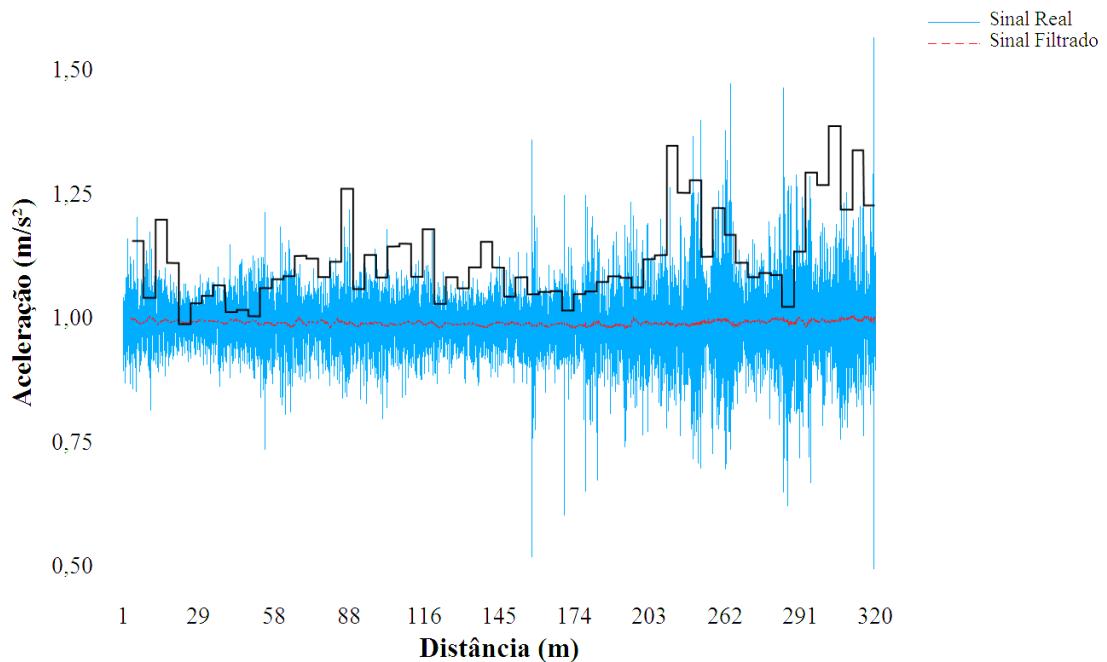
Figura 60 – Comparativo de comportamento dos gráficos (filtro de Kalman)



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 61 – Dados de aceleração na Bicicleta a 5Km/h filtrado por média móvel (sentido Ida)

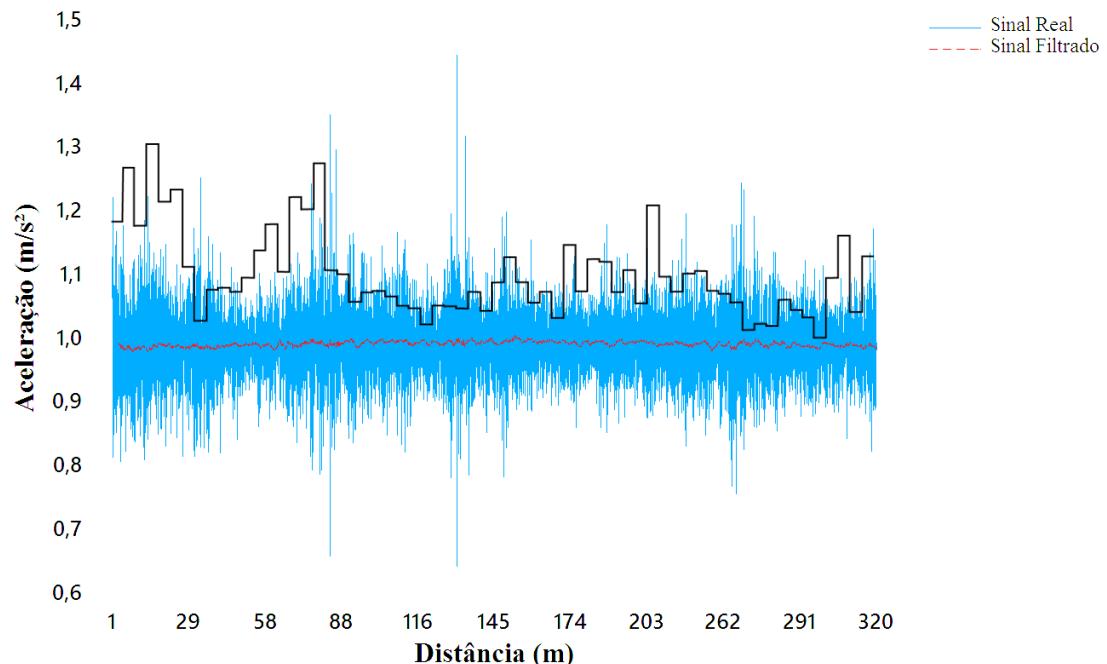
### Sinais de Aceleração Filtrado por Média Móvel (a0522)



Fonte: Elaborada pelo autor

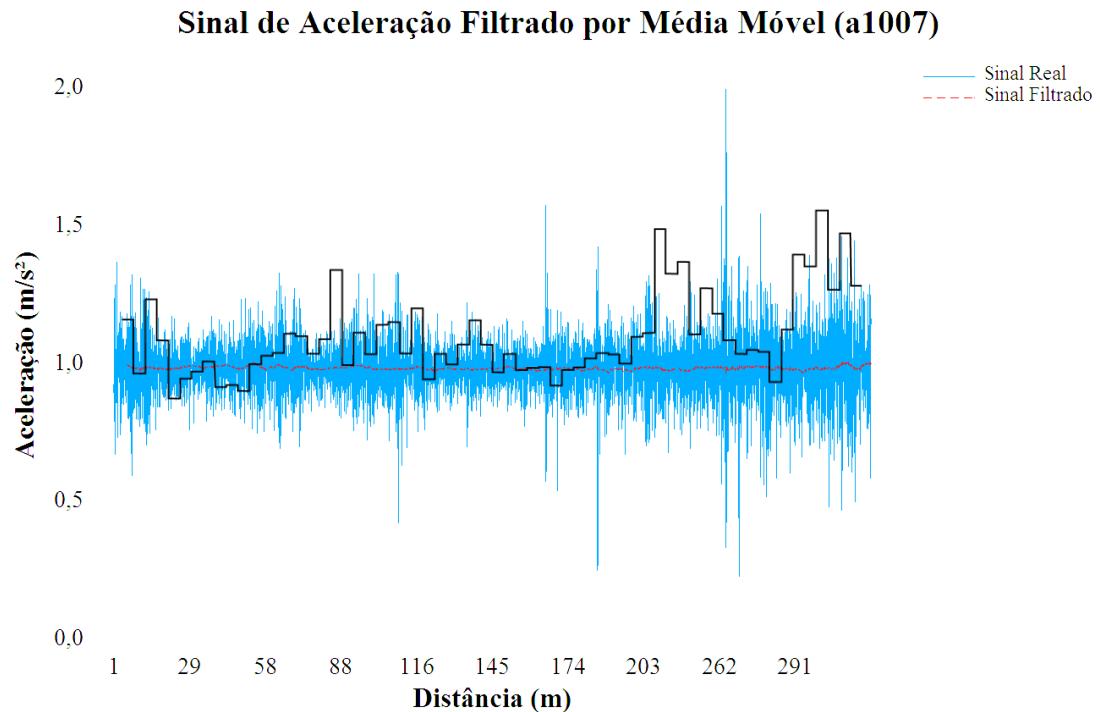
Figura 62 – Dados de aceleração na Bicicleta a 5Km/h filtrado por média móvel (sentido Volta)

### Sinais de Aceleração Filtrado por Média Móvel (a0530)



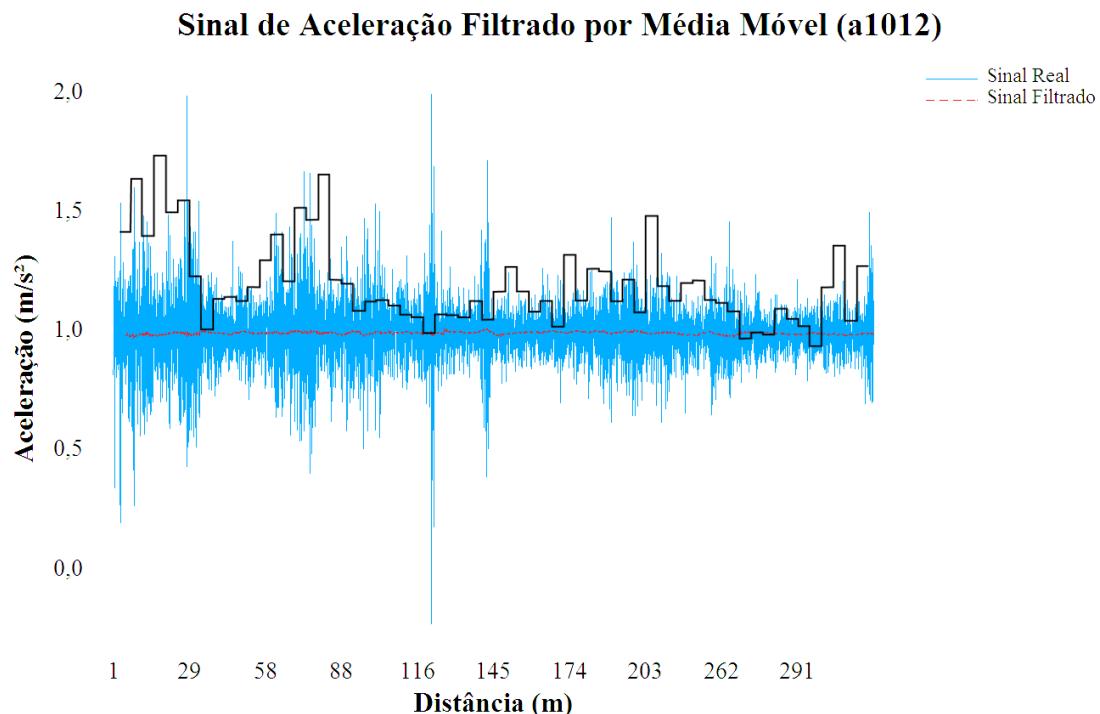
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 63 – Dados de aceleração na Bicicleta a 10Km/h filtrado por média móvel (sentido Ida)



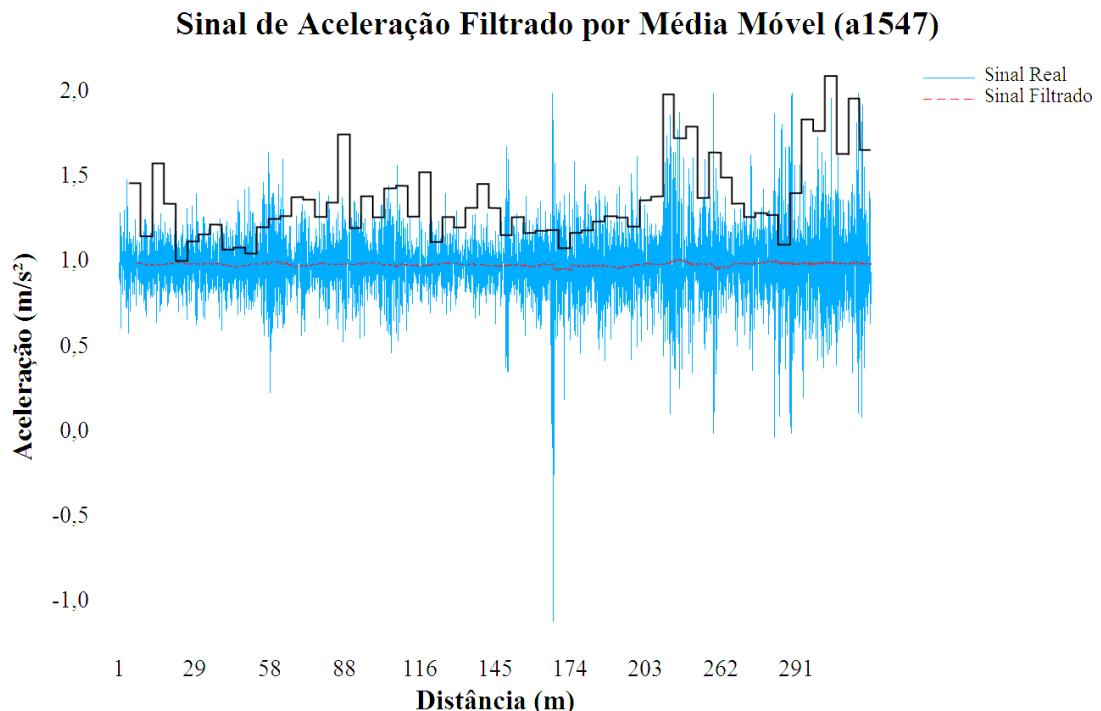
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 64 – Dados de aceleração na Bicicleta a 10Km/h filtrado por média móvel (sentido Volta)



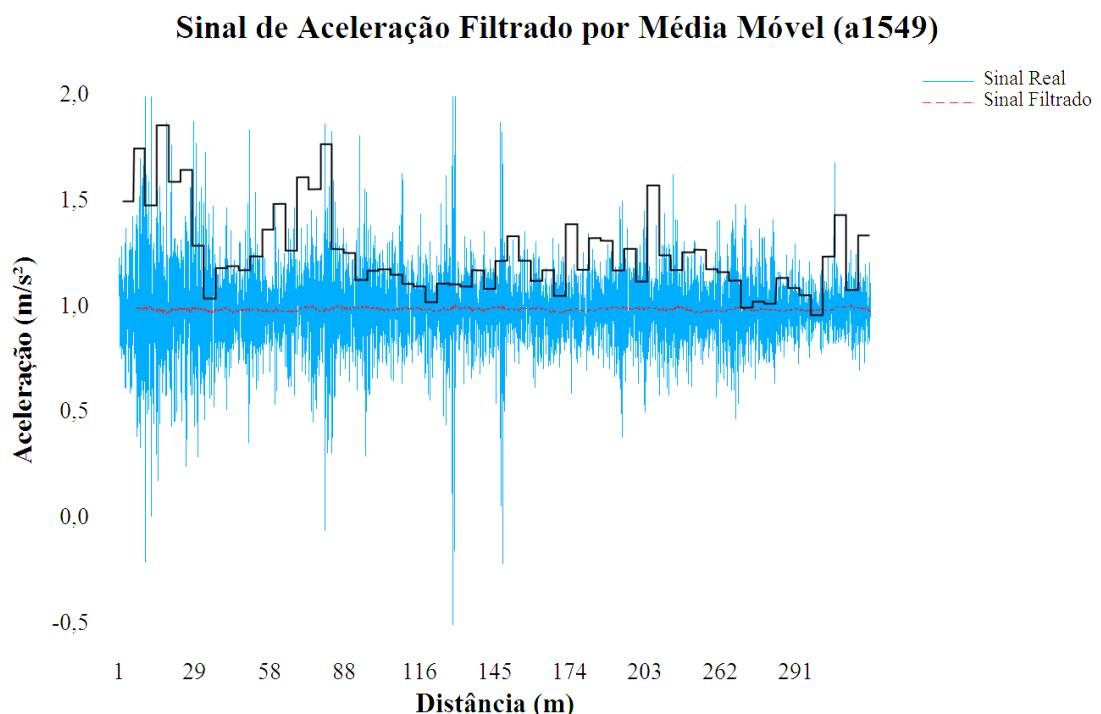
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 65 – Dados de aceleração na Bicicleta a 15Km/h filtrado por média móvel (sentido Ida)



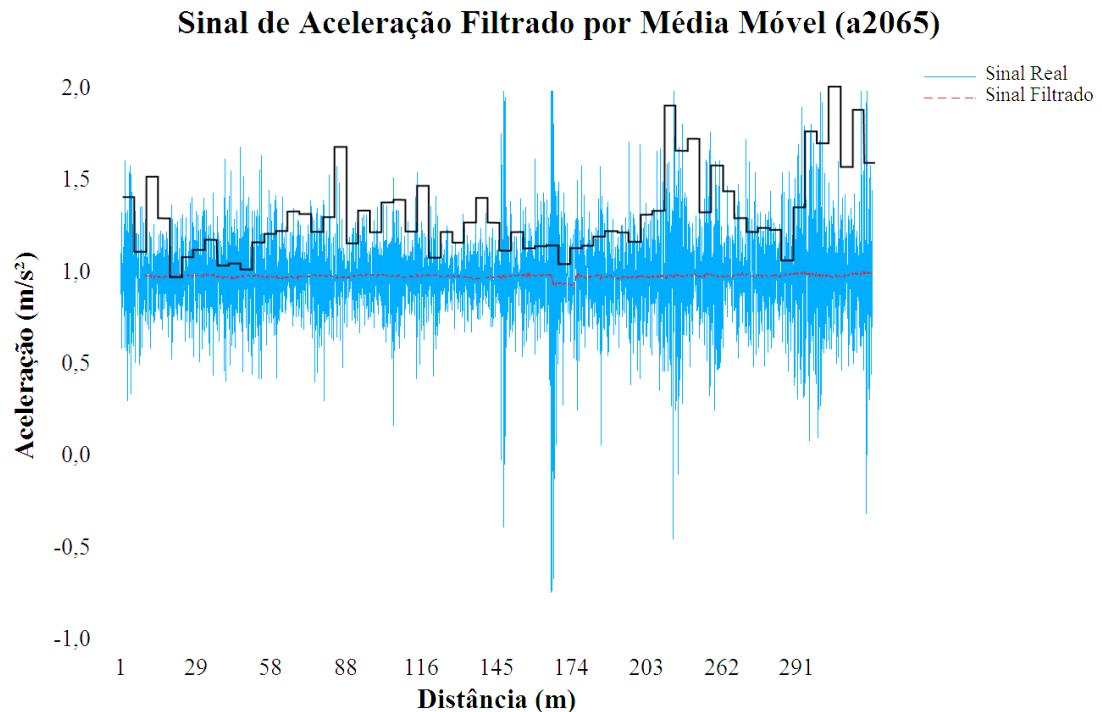
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 66 – Dados de aceleração na Bicicleta a 15Km/h filtrado por média móvel (sentido Volta)



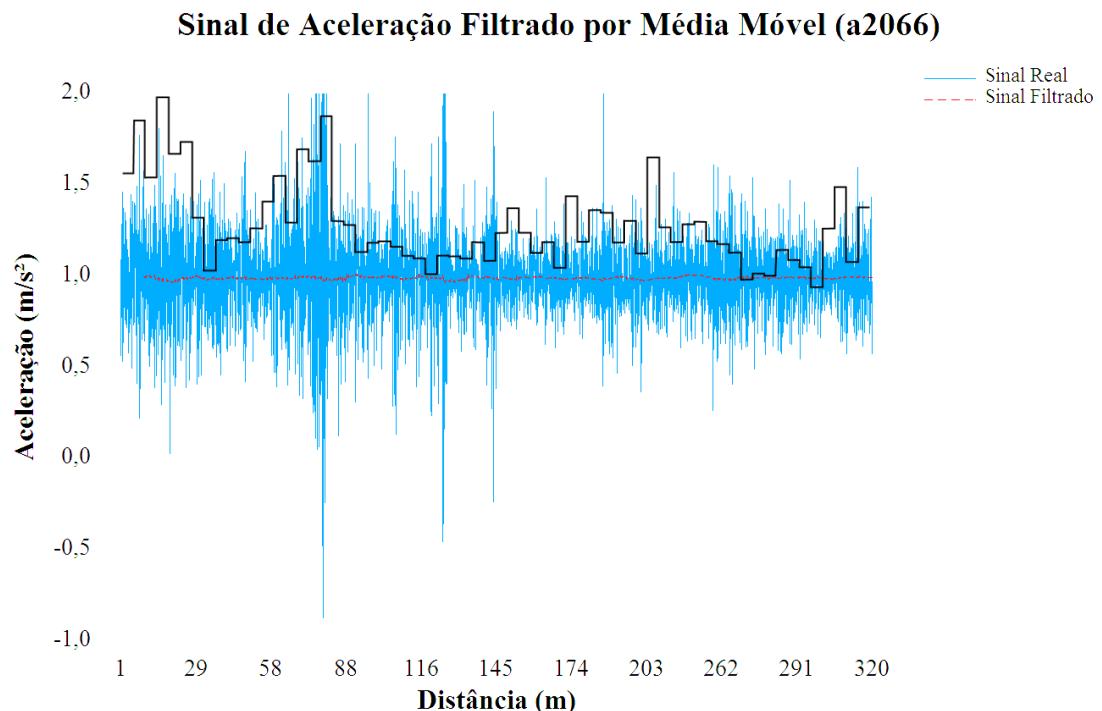
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 67 – Dados de aceleração na Bicicleta a 20Km/h filtrado por média móvel (sentido Ida)



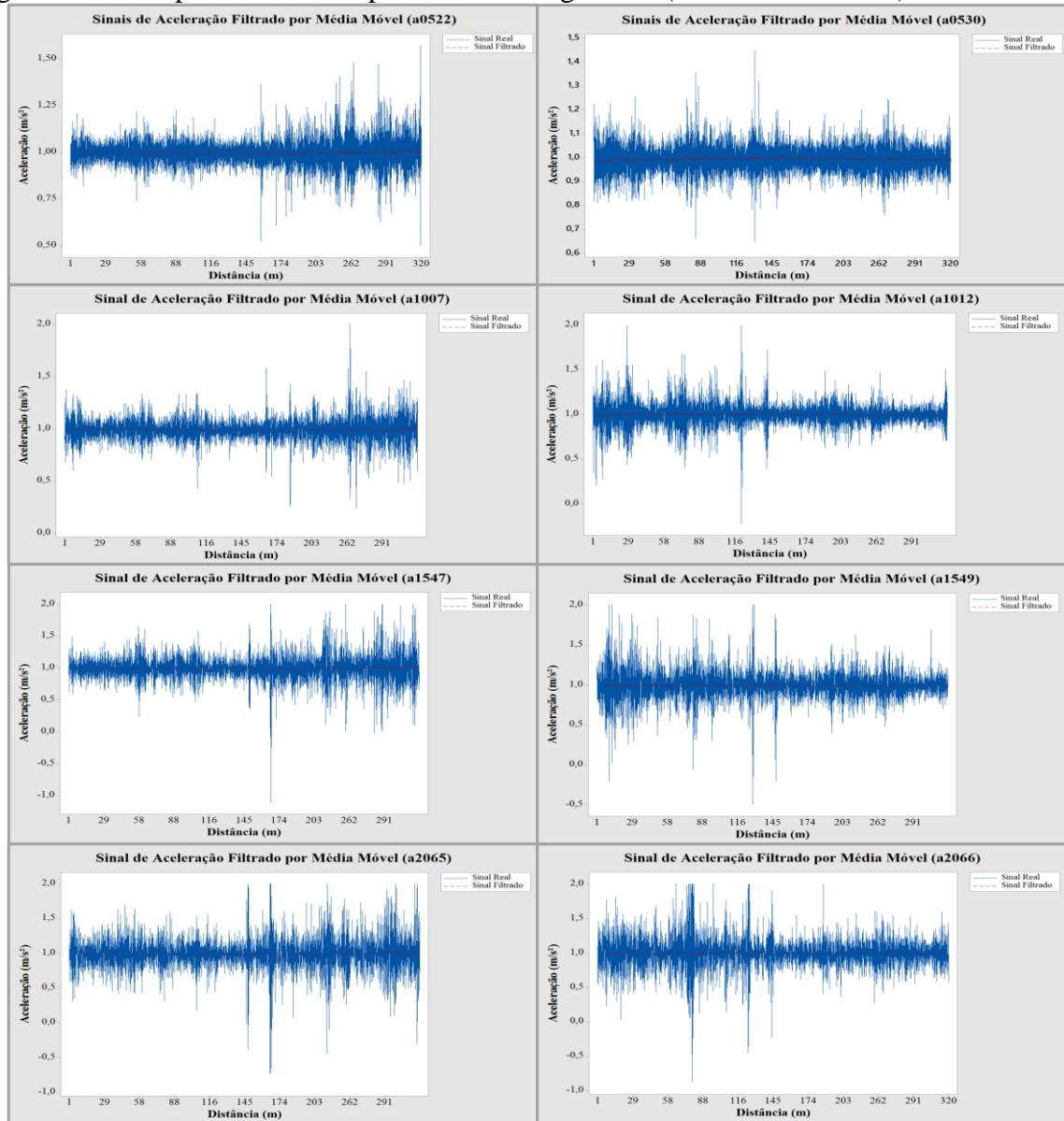
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 68 – Dados de aceleração na Bicicleta a 20Km/h filtrado por média móvel (sentido Volta)



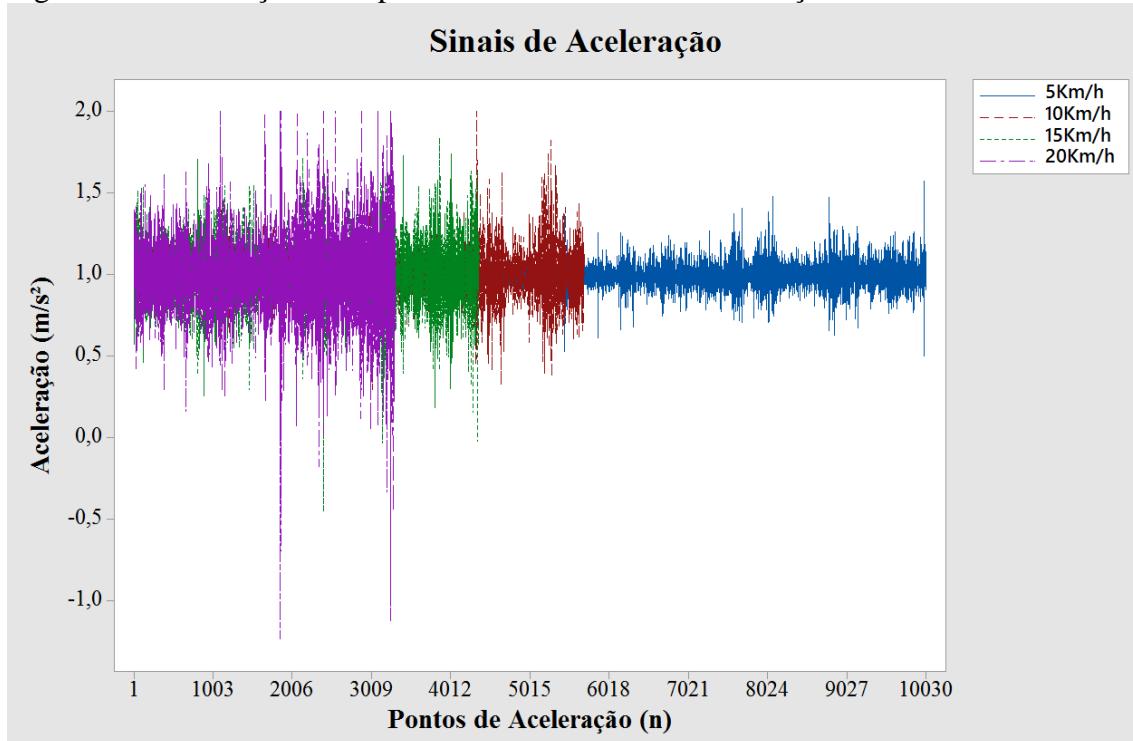
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 69 – Comparativo de comportamento dos gráficos (filtro média móvel)



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 70 - Diferença de Amplitude entre os sinais de aceleração de todas as velocidades



Fonte: Elaborada pelo autor

Pela análise da Figura 50 – Gráfico do IRI do trecho experimental – o IRI do terceiro terço (a partir de 220m) é o mais elevado. Nesse contexto, os gráficos gerados a partir dos dados de aceleração devem apresentar amplitudes maiores nas medições a partir da segunda metade do trecho experimental no sentido Ida. Dessa forma, uma das maneiras de se aferir a eficiência do algoritmo utilizado é se ele irá gerar gráficos com o valor das amplitudes correspondentes aos respectivos valores de IRI do trecho.

Outra hipótese que deve ser analisada é se velocidades maiores geram sinais de aceleração com amplitudes maiores, pois o impacto das irregularidades superficiais do pavimento deve afetar de modo mais intenso o acelerômetro na bicicleta nas velocidades mais altas.

Deve ser aferida também a sensibilidade do equipamento em relação às irregularidades, dado que, devido aos ruídos e imprecisões do sensor, existe a possibilidade de os dados de aceleração vertical obtidos pelo acelerômetro não estarem condizentes com os respectivos índices de irregularidade (IRI) de cada segmento do trecho experimental. Assim, para o teste de hipótese, será definida como nula a hipótese de que a irregularidade longitudinal não interfere no comportamento dos dados de aceleração vertical obtidos e a hipótese alternativa será o contrário da nula, ou seja, a irregularidade longitudinal interfere no

comportamento dos dados de aceleração vertical. Esse teste terá nível de significância de 5%. Dessa forma, se o resultado do teste de hipótese for inferior a 0,05, a hipótese nula será rejeitada.

De acordo com Slifka (2004), para se obter dados de deslocamento a partir de aceleração, deve-se filtrar os dados e executar uma dupla integração, na sequência sugerida pela Figura 43 – Bloco de Processamento de Dados. Os filtros digitais se fazem necessários para excluirem os dados indesejáveis, tidos como ruído do sinal. A partir dessa lógica, todos os dados de aceleração obtidos pelo equipamento proposto nesta pesquisa foram submetidos ao filtro de Kalman ou filtro média móvel.

Pela análise dos gráficos das Figura 51 a Figura 68, é possível observar que todos os sinais filtrados, tanto por Kalman quanto por média móvel, apresentaram uma amplitude, aproximadamente, constante em torno de 1G (1 gravidade =  $9,81\text{m/s}^2$ ) e que a forma dos sinais de aceleração filtrados são semelhantes em todos os gráficos, independente da velocidade, do sentido da viagem e do equipamento utilizado na obtenção dos dados, seja bicicleta, garfo escocês ou trilho de ar.

Esse resultado corrobora com o que foi afirmado por Santana (2004), segundo o qual um sistema de navegação inercial de baixo desempenho não tem condições, por si só, de reproduzir uma trajetória. Além desse autor, Barella (2008) afirma que velocidades maiores permitem obter dados de comprimentos de ondas maiores da superfície do pavimento. Dado que, os ensaios com a bicicleta foram realizados a velocidades relativamente baixas, os resultados obtidos em relação à trajetória do perfil longitudinal estão dentro do esperado de acordo com Santana (2004).

Quanto à irregularidade longitudinal, espera-se que os gráficos apresentem os dados de aceleração com amplitudes maiores nas medições do trecho cujo IRI medido por nível e mira apresenta valores mais elevados. Pela observação dos gráficos gerados pelo filtro de Kalman, esse fenômeno não ocorre. Por exemplo, no gráfico da Figura 51 (gráfico do ensaio no sentido Ida) ocorreu justamente o contrário do esperado e as amplitudes maiores estão mais evidentes no início do gráfico. O mesmo ocorreu com os gráficos das Figura 52 a 59. Na Figura 56, os dados apresentaram-se com uma amplitude relativamente homogênea ao longo do gráfico. Já o gráfico da Figura 57 apresentou uma concentração de amplitudes maiores no início do gráfico. Dessa forma, para esse caso, o filtro de Kalman não apresentou os resultados esperados. Isso talvez porque, para gerar um gráfico de 11000 pontos, por exemplo, esse algoritmo seleciona alguns pontos aleatoriamente para exibi-los nos gráficos e

o intervalo entre os pontos escolhidos é grande, dado que a quantidade de pontos é muito grande. Por isso, alguns dados relevantes para formação do gráfico foram suprimido.

Esse fenômeno, no entanto, não é percebido nos gráficos gerados pelo filtro média móvel no *software* Minitab. Pela análise dos gráficos da Figura 61 a Figura 68. Por exemplo, o gráfico da Figura 61 – Dados de aceleração na Bicicleta a 5Km/h filtrado por média móvel (sentido Ida) apresenta os dados de amplitudes maiores a partir da metade do gráfico em diante. Isso atende o esperado e corrobora com o gráfico da Figura 50 – Gráfico do IRI do trecho experimental.

Da mesma forma, o gráfico da Figura 64 – Dados de aceleração na Bicicleta a 10Km/h filtrado por média móvel (sentido Volta) – também atende ao que se espera para analisar os dados de aceleração. Pela observação do gráfico da referida figura, nota-se que os dados com maiores amplitudes estão na primeira metade do gráfico, pois o ensaio foi gerado no sentido Volta, conforme a legenda da figura. Esse gráfico também condiz com o da Figura 50. Esse fenômeno é observado em todos os gráficos gerados pelo filtro média móvel e expostos neste capítulo independente da velocidade do ensaio.

Portanto, quanto à eficiência do algoritmo referente à correspondência entre o comportamento do sinal e o valor do IRI medido no trecho experimental, o filtro média móvel, do programa Minitab, apresentou melhores resultados que o filtro de Kalman executado pelo Matlab.

As Figura 60 e 69 apresentam o comparativo dos comportamentos dos sinais de aceleração obtidos pelo acelerômetro gerados, respectivamente, pelo filtro de Kalman e pelo filtro média móvel.

Quanto ao teste de hipótese e do coeficiente de determinação, foi realizada uma regressão linear simples tendo como variáveis o IRI e os coeficientes de variação dos dados de aceleração de cada segmento de 5m do trecho experimental. Os coeficientes de variação foram obtidos conforme o procedimento executado na subseção referente ao processamento dos dados do capítulo anterior. A Tabela 7 apresenta o nome de cada sinal de aceleração com os respectivos sentidos das passagens nos ensaios realizados com a bicicleta, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e os resultados de teste de hipótese (P). A Tabela 8 apresenta o resumo dos resultados estatísticos.

Para a análise da Tabela 8, são considerados resultados satisfatórios aqueles nos quais, segundo a regressão utilizada, a hipótese nula pode ser rejeitada com 95% de grau de confiabilidade ( $P<0,05$ ) e com o mesmo nível de certeza a hipótese alternativa será considerada verdadeira. Como dito anteriormente, a hipótese nula é a que admite que a

irregularidade longitudinal não interfere nos dados de aceleração vertical obtidos pelo acelerômetro.

Pela análise da Tabela 8, é possível observar que em 10 dos 11 ensaios realizados na velocidade de 5Km/h, em 3 dos 4 ensaios realizados na velocidade de 10Km/h com a suspensão destravada, em 8 dos 10 ensaios realizados na velocidade de 15Km/h e em 7 dos 8 ensaios realizados na velocidade de 20Km/h os resultados foram considerados satisfatórios. Isso significa que em 85% desses resultados o acelerômetro realizou leituras condizentes com as irregularidades dos respectivos segmentos de 5m do trecho experimental.

Nos ensaios realizados na velocidade de 10Km/h com a suspensão travada o percentual de resultados satisfatórios (60%) foi menor que os dos ensaios citados no parágrafo anterior. Isso se deve, provavelmente, aos desvios realizados na trajetória de cada passagem. Pelo nome dos sinais de aceleração, é possível perceber que os ensaios realizados a 10Km/h foram os primeiros a serem realizados no dia 21 de março de 2017. Logo, nesse início da bateria de ensaios houve uma curva de aprendizado para a execução das passagens. Além disso, esses ensaios foram realizados no início da tarde e esse é um período com um pouco mais de movimento no trecho experimental desta pesquisa. Dado este fato, houve a necessidade de se efetuar alguns desvios de pedestres ou veículos que eventualmente estavam passando na trajetória dos ensaios ao mesmo tempo em que estes estavam sendo executados.

Os ensaios realizados a 25km/h apresentaram o pior resultado, 20% satisfatórios. Esse fato deve-se, possivelmente, ao fato de que, em velocidades mais altas, a bicicleta passa pelas irregularidades da superfície de modo que as irregularidades longitudinais de comprimento de ondas muito pequeno não foram capazes de excitar o acelerômetro.

É importante mencionar também a imprecisão de localização de início e fim de cada medição realizada com a bicicleta, pois as medições só poderiam ser iniciadas quando a bicicleta atingisse as respectivas velocidades de ensaio. No caso do trecho experimental, o espaço com revestimento asfáltico propício ao ganho de velocidade era muito curto.

Para finalizar esta subseção de análise dos resultados, discute-se a hipótese de que o acelerômetro obtém sinais de aceleração vertical com amplitudes maiores nos ensaios na bicicleta realizados com velocidades mais altas. O gráfico da Figura 70 - Diferença de Amplitude entre os sinais de aceleração de todas as velocidades – torna verdadeira essa hipótese. É possível observar que o gráfico correspondente à velocidade de 5Km/h apresenta sinal com valores de aceleração vertical menores que os de aceleração de 10Km/h, que apresenta sinal com valores da amplitude menor que o de 15Km/h. Ainda pela análise da

Figura 70, nota-se que os dados de aceleração vertical do ensaio de bicicleta realizado a 20Km/h apresentam as maiores amplitudes.

Tabela 7 – Resultados estatísticos dos dados de aceleração vertical obtidos pela bicicleta a cada 5m

Dados de aceleração	Sentido da Viagem	R <sup>2</sup> (Coef. Var. x IRI)	P	Dados de aceleração	Sentido da Viagem	R <sup>2</sup> (Coef. Var. x IRI)	P
a0522	Ida	20,20%	0	a1539	Ida	0,90%	0,467
a0527	Ida	19,00%	0	a1544	Volta	13,80%	0,003
a0528	Volta	6,40%	0,044	a1545	Ida	10,50%	0,009
a0529	Ida	8,70%	0,018	a1546	Volta	23,70%	0
a0530	Volta	4,90%	0,08	a1547	Ida	16,70%	0,001
a0531	Ida	16,60%	0,001	a1549	Volta	14,90%	0,002
a0532	Volta	7,90%	0,025	a1550	Ida	17,60%	0,001
a0533	Ida	11,90%	0,005	a1552	Volta	12,40%	0,004
a0536	Volta	12,60%	0,004	a1553	Ida	5,80%	0,054
a0537	Ida	8,90%	0,017	a1554	Volta	10,60%	0,009
a0538	Volta	18,00%	0	a2055	Ida	15,90%	0,001
a1002	Ida	6,40%	0,044	a2062	Volta	18,40%	0
a1003	Volta	0,50%	0,583	a2063	Ida	8,40%	0,02
a1005	Ida	16,00%	0,001	a2064	Volta	29,40%	0
a1006	Volta	7,60%	0,028	a2065	Ida	5,70%	0,058
a1007	Ida	16,50%	0,001	a2066	Volta	15,80%	0,001
a1008	Volta	4,00%	0,113	a2067	Ida	8,20%	0,022
a1009	Ida	40,00%	0	a2068	Volta	15,70%	0,001
a1010	Volta	17,30%	0,001	a2569	Ida	0,30%	0,693
a1011	Ida	6,00%	0,051	a2570	Ida	5,30%	0,066
a1012	Volta	14,50%	0,002	a2511	Ida	0,60%	0,541
a1013	Ida	5,00%	0,076	a2512	Ida	2,30%	0,236
a1014	Volta	17,60%	0,001	a2514	Ida	6,10%	0,05
a1015	Ida	8,30%	0,021	a2515	Ida	2,30%	0,235
a1016	Volta	4,90%	0,079	a2517	Ida	14,00%	0,002
				a2518	Ida	7,60%	0,027
				a2519	Ida	0,70%	0,525
				a2520	Ida	0,00%	0,961

Tabela 8 – Resumo dos resultados estatísticos dos ensaios com a bicicleta

Velocidade (km/h)	Nº de Viagens	Freq.	Resultados Satisfatórios	% de resultados Satisfatórios
5	11	50Hz	10	91%
10 (Susp. Destrav.)	4	50Hz	3	75%
10 (Susp. Trav.)	10	50Hz	6	60%
15	10	50Hz	8	80%
20	8	50Hz	7	87,5%
25	10	100Hz	2	20%

Fonte: Elaboradas pelo autor

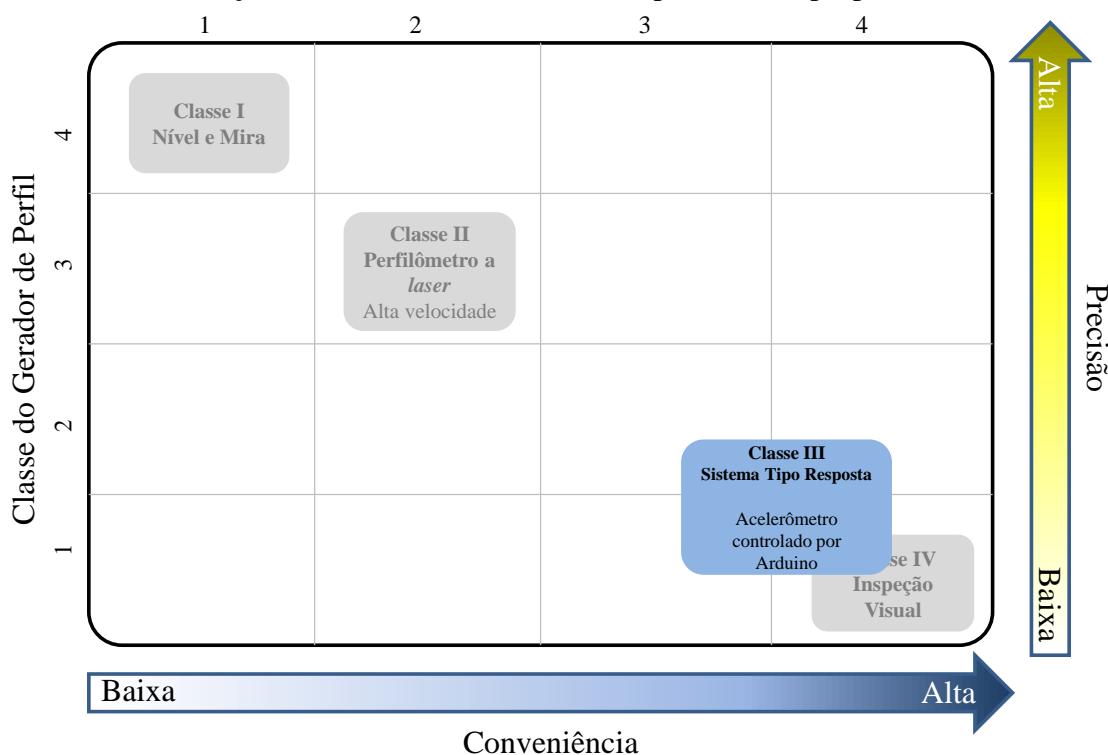
#### 4.4 Classificação do equipamento proposto

O equipamento composto por um acelerômetro controlado por arduino é, na classificação de Karamihas e Sayers (1998), um equipamento de medição indireta, pois não calcula o IRI diretamente.

Além disso, esse equipamento é classificado também como um sistema tipo resposta, pois os dados de aceleração vertical obtidos estão intrinsecamente relacionados ao modo de como a irregularidade longitudinal afeta o comportamento do veículo que o transportou. No caso desta pesquisa, o veículo foi a bicicleta.

A Figura 71 mostra uma sugestão de posicionamento do equipamento (Classe III) no gráfico que relaciona a precisão e conveniência dos equipamentos. Apesar de ser um equipamento do tipo-resposta, ele não calcula o IRI, que poderia ser estimado pelos dados de aceleração.

Figura 71 - Classificação do Acelerômetro controlado por arduino proposto



Fonte: Adaptado de TOMIYAMA et al. (2012)

A Tabela 9 apresenta um comparativo entre o equipamento proposto nesta pesquisa e métodos de outras classes de equipamentos medidores de irregularidade longitudinal em relação à capacidade de cálculo do IRI, custo, conveniência, precisão, vantagens e desvantagens.

Tabela 9 - Comparativo entre o equipamento proposto e métodos de outras classes de equipamentos medidores de irregularidade longitudinal

	<b>Classe I</b>	<b>Classe II</b>	<b>Classe III</b>	<b>Equipamento Proposto</b>	<b>Classe IV</b>
<b>Exemplo de Equipamento</b>	Nível e mira	Perfilômetro inercial	Roughmeter	Acelerômetro controlado por arduino	Avaliação subjetiva
<b>Cálculo do IRI</b>	Direto	Direto	Indireto	Não calcula o IRI	Não calcula o IRI
<b>Custo (aproximado)</b>	R\$ 8.000,00	R\$ 395.000,00	R\$ 46.000,00	R\$ 1.200	R\$ 0,00
<b>Conveniênci a</b>	Muito baixa	Regular	Alta	Alta	Alta
<b>Precisão</b>	Muito alta	Alta	Regular	Baixa	Baixa
<b>Vantagens</b>	Custo baixo	Alto desempenho	Custo médio	Custo baixo	Custo baixo
<b>Desvantagens</b>	Baixo desempenho	Custo Elevado	Requer calibração	Requer calibração	Resultado impreciso

Fonte: O Autor

## 5. CONCLUSÃO

A possibilidade de se obter, de modo econômico, informações sobre a evolução dos defeitos na superfície dos pavimentos associadas às suas causas pode facilitar a execução do monitoramento por parte dos gestores de pavimentos rodoviários. A partir dos resultados apresentados nesta pesquisa, ficou evidenciado que realizar uma avaliação nas irregularidades longitudinais de modo simples e custos reduzidos pelo uso de sensores inerciais é factível e eficiente.

Pelo desenvolvimento do protótipo de equipamento composto por um acelerômetro controlado por um arduino, foi possível obter dados de aceleração vertical de uma bicicleta provocada pelas irregularidades superficiais de um dado trecho experimental. Esses dados foram processados e tratados com o intuito de se obter, inicialmente, uma trajetória correlata ao perfil longitudinal de um pavimento. Pela análise dos dados filtrados foi possível observar que, para este fim, o equipamento proposto é ineficiente nos cenários escolhidos, pois os sinais filtrados pelo filtro de Kalman ou média móvel não apresentaram qualquer semelhança visual com o perfil longitudinal levantado pelo método nível e mira. Comprimentos de ondas grande interferem movimentos em alta velocidades. Talvez em ensaios realizados em velocidade superiores a 300Km/h essa trajetória do perfil podesse ser obtida com o uso de um acelerômetro. Essa velocidade de 300km/h é a velocidade de pouso de uma aeronave, cujo sistema de controle de estabilidade acusa se a pista de pouso e decolagem apresentar solavancos com comprimentos de onda de, aproximadamente, 120m.

No entanto, o protótipo apresentou elevado potencial para avaliar a irregularidade longitudinal de um pavimento. Pela análise do gráfico referente aos valores de IRI e dos gráficos referentes ao comportamento dos sinais de aceleração, é possível concluir que há correlação entre esses dois parâmetros. Foi possível observar que, pelo uso do filtro média móvel, os trechos nos quais o IRI apresentou valores mais elevados, os sinais de aceleração também apresentaram valores maiores. Desse modo, conforme os resultados, ficou descartada a hipótese de que a irregularidade longitudinal não afeta o comportamento dos dados de aceleração vertical.

Além disso, foi possível verificar que a velocidade também interfere no comportamento dos sinais de aceleração vertical, pois velocidades maiores provocaram amplitudes mais elevadas nos valores de aceleração. Essa variável, porém, não foi incluída nas regressões estatísticas desenvolvidas neste trabalho. A não inclusão da velocidade e outros fatores, tais como, o tipo de bicicleta, o raio da roda, o peso do operador e a pressão dos

pneus, pode ser, possivelmente, a causa de os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) terem sido tão baixos.

Assim, um provável trabalho futuro será analisar o efeito da velocidade e dos demais fatores supracitados no comportamento dos sinais de aceleração vertical. Essa análise deverá ser realizada utilizando-se, além da bicicleta, outros veículos, como os de passeio e caminhonetes. Desse modo, será possível executar mais ensaios com uma faixa de velocidades maiores.

Além disso, juga-se razoável avaliar se os dados de aceleração dos outros eixos do acelerômetro também interferem no comportamento dos dados de aceleração vertical. Outro que fator que poderia alterar o comportamento dos dados de aceleração é o tipo de bicicleta, pois uma bicicleta do tipo *Speed* sem suspensão apresenta uma configuração de peso e rigidez distinta da que foi utilizada neste trabalho.

Há ainda a possibilidade de se avaliar o comportamento de outros filtros digitais, como o passa-alta, e calibrar o equipamento com o intuito de calcular o IRI.

Avaliar a utilização do equipamento em vias não pavimentadas, haja vista que os equipamentos das classes I e II tendem a apresentar comportamento inconsistente nesse tipo de vias devido à presença de poeira e agregados soltos. Além de vias não pavimentadas, sugere-se avaliar o comportamento do equipamento proposto em pavimentos rígidos, pois o reflexo do laser interfere nas medições dos equipamentos de classe I e II.

## REFERÊNCIAS

- 4TEC. – 2016. Disponível em <http://4tec-amaac.blogspot.com.br/>. Acesso em: 15 nov. 2016.
- ABULIZI, Nueraihemaitjiang et al. Measuring and evaluating of road roughness conditions with a compact road profiler and ArcGIS. **Journal of Traffic and Transportation Engineering** (English Edition), v. 3, n. 5, p. 398-411, 2016.
- ALLISON, James T.; KOKKOLARAS, Michael; PAPALAMBROS, Panos Y. Optimal partitioning and coordination decisions in decomposition-based design optimization. **Journal of Mechanical Design**, v. 131, n. 8, p. 081008, 2009.
- ALMEIDA, L. C. – **Avaliação da Irregularidade Longitudinal das Pistas de Pouso e Decolagem de Aeroportos Brasileiros** – 96f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil – Universidade de Fortaleza. 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - **Regulamento Brasileiro Da Aviação Civil RBAC nº 153.** 2012
- BALBO, José Tadeu; BARELLA, Rodrigo Maluf; MASSARA FILHO, Sergio Orlando; **Irregularidade Longitudinal de Pavimentos: Sensibilidade de Perfis, Correlação Entre QI e IRI e Comparaçao de Equipamentos.** 2005.
- BARELLA, Rodrigo Maluf. **Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais.** 2008. 362f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transporte). Universidade de São Paulo, 2008.
- BELZOWSKI, Bruce; EKSTROM, Andrew. Evaluating roadway surface rating technologies. 2015.
- BERNUCCI, Liedi Bariani et al. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. **Rio de Janeiro**, p. 504, 2007.
- BISCONSINI, Danilo Rinaldi. **Avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos com dados coletados por smartphones.** 2016. 208f. Dissertação (Mestrado em Ciências - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016
- BPR – 2017. Disponível em <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/736x/ce/36/6a/ce366a672b860b9f2c98ca5d990f9994.jpg>. Acesso em: 05 jun. 2017.
- CAREY JR, W. N.; IRICK, P. E. The pavement serviceability-performance concept. **Highway Research Board Bulletin**, n. 250, 1960.
- CAMPOS, S. M - **Solução Eletrônica Para Navegação Veicular.** – Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Teleinformática. 59f. Universidade Federal do Ceará. 2013
- CENTRO DE INVESTIGAÇÃO E PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS. **Relatórios finais.** 2017. Disponível em <http://www.cenipa.aer.mil.br/cenipa/paginas/relatorios/relatorios-finais>. Acesso em: 09 abr. 2017.
- CHATFIELD, Averil B. **Fundamentals of high accuracy inertial navigation.** Aiaa, 1997.

C. N. T. Confederação Nacional dos Transportes. Modais de Cargas, Passageiros, Aquaviários, Ferroviários e Autônomos. CNT, 2017.

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

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

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

**DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. O Sistema Gerencial de Pavimentos do DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.** DNER-PRO 182/94. Ministério dos Transportes, Rio de Janeiro. 2000.

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

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

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

**DEVORE, Jay L. Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências.** Pioneira Thomson Learning, 2006.

**DOUANGPHACHANH, Viengnam. The Development of a Simple Method for Network-wide Road Surface Roughness Condition Estimation and Monitoring Using Smartphone Sensors.** 2014.

**DU, Yuchuan et al. Measurement of International Roughness Index by Using-Axis Accelerometers and GPS. Mathematical Problems in Engineering,** v. 2014, 2014.

**DYNATEST. Relatório Técnico – Catálogo de Soluções de Manutenção para Pavimentos Flexíveis.** Dynatest Engemap. 2015.

**FHWA (2002) - Pavement Smoothness Index Relationships: Final Report. PUBLICATION NO. FHWA-RD-02-057. OCTOBER,2002**

**FONSECA, L. F. S. Análise das soluções de pavimentação do programa CREMA 2<sup>a</sup>. Etapa do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.** 2013. 247f. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.

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

GILLESPIE, Thomas D. Everything you always wanted to know about the iri, but were afraid to ask. **The University of Michigan Transportation Research Institute. Nebraska**, 1992.

HANSON, Trevor; CAMERON, Coady; HILDEBRAND, Eric. Evaluation of low-cost consumer-level mobile phone technology for measuring international roughness index (IRI) values. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 41, n. 9, p. 819-827, 2014.

IDELETRÔNICA. 2017. Disponível em <http://idelectronica.com.mx/wp-content/uploads/2015/09/50006.jpg>. Acesso em: 21 abr. 2017.

INGLE, Vinay K.; PROAKIS, John G. **Digital Signal Processing Using MATLAB: A Problem Solving Companion**. Cengage Learning, 2010.

ISLAM, Shahidul et al. Measurement of pavement roughness using android-based smartphone application. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2457, p. 30-38, 2014.

KARAMIHAS, S. M ; SAYERS, M. W. The little book of profiling: basic information about measuring and interpreting road profiles. 1998.

KARAMIHAS, Steven M.; BARNES, Michelle A.; RASMUSSEN, Robert O. **Pavement surface specification for road load measurement**. 2014.

LEARNCATE. 2017. Disponível em <https://www.learncafe.com/cursos/arduino-i-arduino-ii>. Acesso em: 19 abr. 2017.

MATHWORKS. 2017. Disponível em <https://www.mathworks.com/help/coder/examples/c-code-generation-for-a-matlab-kalman-filtering-algorithm.html?prodcode=ML>. Acesso em: 26 de abr. 2017.

NUNES, RAFAEL ASTUTO AROUCHE et al. Introdução a Processadores de Sinais Digitais-DSP. **Apostila Da CBPF, Rio De Janeiro**, 2006.

PAPOULIS, Athanasios; PILLAI, S. Unnikrishna. **Probability, random variables, and stochastic processes**. Tata McGraw-Hill Education, 2002.

PERERA, Rohan W.; KOHN, Starr D.; RADA, Gonzalo R. **LTPP manual for profile measurements and processing**. 2008.

PIMENTA, Carlos Reynaldo Toledo; DE OLIVEIRA, Marcio Pires. **Projeto geométrico de rodovias**. RiMa, 2004.

PORTALACTION. 2017. Disponível em <http://www.portalaction.com.br/analise-de-regressao/16-coeficiente-de-determinacao>. Acesso em: 09 de jul. 2017.

RAMALHO, Rute Castro Lopo. **Diretrizes para a avaliação funcional de pavimentos aeronáuticos**. 2013.

RUIDE. **Manual do Fabricante do Nível Digital DL-201 – 2016**. Disponível em [http://media.wix.com/ugd/052a5c\\_4934c3f1da174654900425fbc29c7be9.pdf](http://media.wix.com/ugd/052a5c_4934c3f1da174654900425fbc29c7be9.pdf). Acesso em: 18 dez. 2016.

SANTANA, D. S., CAMPOS, V. A., FURUKAWA, C. M., & MARUYAMA, N. Estimação de trajetórias utilizando sistema de navegação inercial strapdown. In: **XV Congresso Brasileiro de Automática**. sn, 2004..

SANTANA, Douglas Daniel Sampaio. **Navegação terrestre usando unidade de medição inercial de baixo desempenho e fusão sensorial com filtro de Kalman adaptativo suavizado**. 2011. 230f. Tese (Doutorado em Engenharia de Controle e Automação Mecânica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SAYERS, M. W., Gillespie, T. D., & Paterson, W. D. Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements (No. Technical Paper 46). 1986a.

SAYERS, M. W., Gillespie, T. D., & Queiroz, A. V. The international road roughness experiment: Establishing correlation and a calibration standard for measurements. (No. HS-039 586). 1986b.

SILVA, João Lucas de S. et al. Plataforma Arduino integrado ao PLX-DAQ: Análise e aprimoramento de sensores com ênfase no LM35. **Escola Regional de Computação Bahia, Alagoas e Sergipe. Feira de Santana. Anais. Feira de Santana: Sociedade Brasileira de Computação**, 2014.

SLIFKA, Lance D. **An accelerometer based approach to measuring displacement of a vehicle body**. 2004. 66f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação). University of Michigan–Dearborn.

SMITH, Steven W. et al. The scientist and engineer's guide to digital signal processing. 1997.

TOMIYAMA, Kazuya; KAWAMURA, Akira. Application of lifting wavelet transform for pavement surface monitoring by use of a mobile profilometer. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 9, n. 5, p. 345-353, 2016.

WANG, Hao. **Road Profiler Performance Evaluation and Accuracy Criteria Analysis**. 2006. Tese de Doutorado. Virginia Polytechnic Institute and State University.

WEAVER, Robert J. Quantifying pavement serviceability as it is judged by highway users. **Transportation Research Record**, n. 715, 1979.

WELCH, Greg; BISHOP, Gary. An introduction to the Kalman filter. 1995.

## **APÊNDICE A – DESAFIOS DA MONTAGEM DO EQUIPAMENTO**

### **1. MONTAGEM DO PROTÓTIPO (1<sup>a</sup> VERSÃO)**

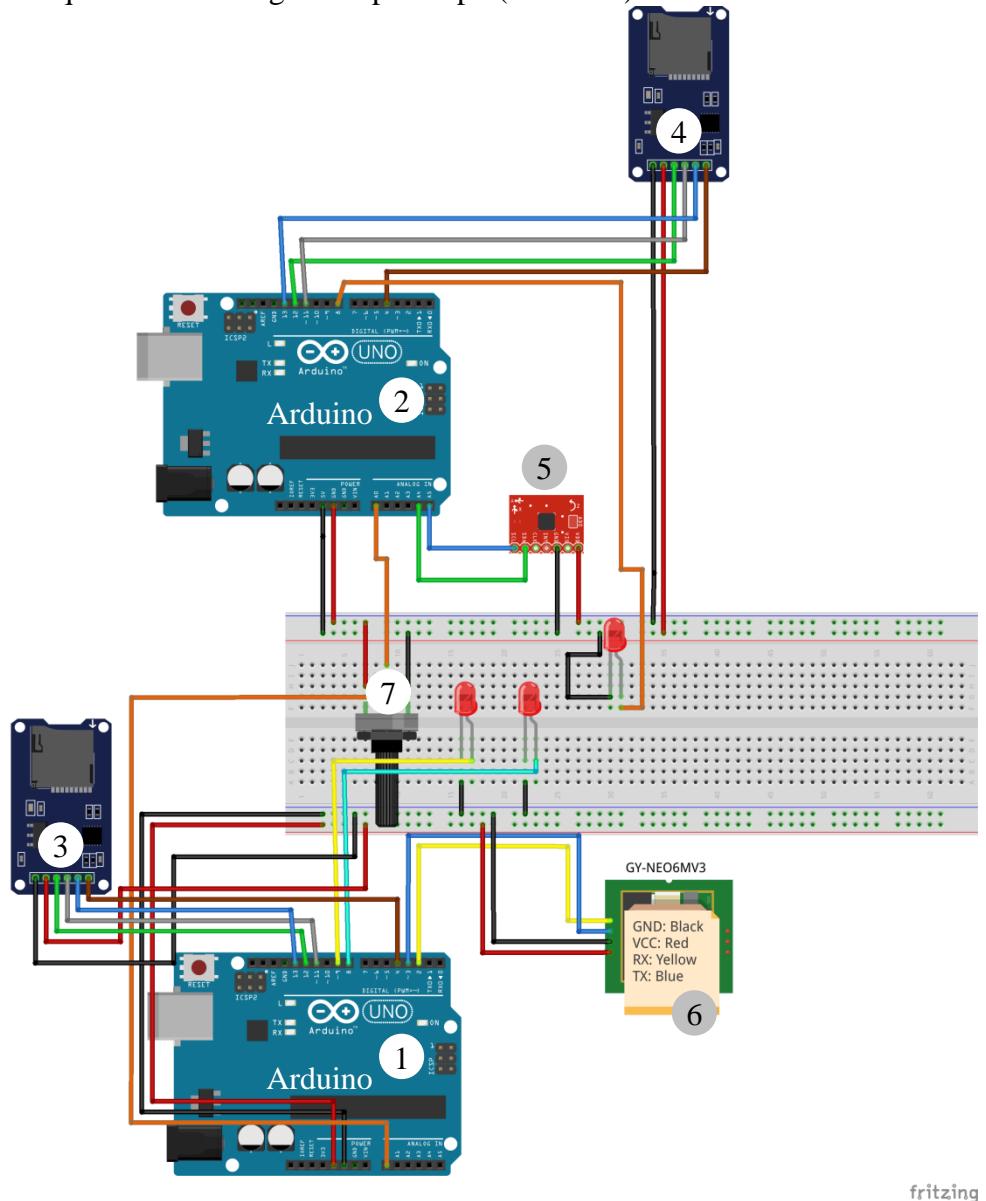
A proposta inicial do projeto consistiu no desenvolvimento do protótipo funcional para aquisição de dados de aceleração vertical geolocalizados. O protótipo seria utilizado para realizar o levantamento do perfil longitudinal do pavimento para medição da irregularidade de pavimentos rodoviários, executando a obtenção e armazenando os dados em campo.

Para alcançar esse objetivo, o protótipo foi constituído, na sua primeira versão, por dois microcontroladores arduino, nos quais estavam embarcados *softwares* desenvolvidos especificamente para a finalidade do projeto. Além desses circuitos, também fazem parte um acelerômetro, um módulo de GPS e dois módulos de cartão de memória.

O acelerômetro é o responsável pela obtenção dos dados de aceleração. O módulo de GPS responde pela obtenção dos dados de geolocalização. E os dois módulos de cartão SD, pelo armazenamento dos dados coletados, sendo um módulo de cartão SD para armazenar os dados do acelerômetro e outro para armazenar os dados do módulo de GPS. A necessidade de se utilizar dois microcontroladores e dois módulos de armazenamento de dados será justificada posteriormente. A arquitetura da versão inicial do protótipo segue o esquema ilustrado na Figura 72, criada utilizando-se o *software Fritzing*:

Uma das conexões para comunicação entre o microcontrolador arduino e um computador é designada por interface serial. Por ela, é possível criar arquivos e escrever neles os dados obtidos pelo acelerômetro e pelo GPS. Como será visto posteriormente, essa comunicação serial limitou muito a frequência de leitura do acelerômetro e isso poderia comprometer o desempenho do equipamento.

Figura 72 – Esquema da montagem do protótipo (1<sup>a</sup> versão)



Fonte: Elaborada pelo autor

Os números indicam, respectivamente:

- 1 → Arduino (GPS);
  - 2 → Arduino (Acelerômetro);
  - 3 → Módulo de armazenamento de dados (GPS);
  - 4 → Módulo de armazenamento de dados (Acelerômetro);
  - 5 → Módulo de Aceleração (Acelerômetro);
  - 6 → Módulo de GPS;
  - 7 → Potenciômetro.

A tecnologia adotada para prototipação foi a plataforma arduino modelo UNO R3. Essa é uma plataforma de desenvolvimento eletrônico de código aberto e de baixo custo, aproximadamente R\$ 100,00, baseada no microcontrolador Atmel AVR ATmega328P.

A plataforma foi adotada tendo em vista o baixo custo, a vasta documentação disponível, a compatibilidade com diversos periféricos existentes no mercado e a viabilidade para desenvolver uma prova de conceito em tempo hábil. Os outros componentes adotados foram o módulo de GPS (referência: NEO-6M), o módulo acelerômetro e giroscópio de 3 eixos (referência: 6 DOF MPU-6050 GY-521) e os módulos Catalex Micro SD *Card Adapter*. Esse último módulo é o responsável por escrever os dados no cartão de memória do sistema.

## 2. SOBRE AO ACELERÔMETRO

O desempenho do protótipo referente à sua capacidade de escrever dados no cartão de memória foi mensurado através da contagem da quantidade de dados gravados por segundo. A taxa esperada para o acelerômetro, de acordo com dados obtidos na especificação do fabricante, era de 100 amostras por segundo (100Hz) ou superior. Porém, nos testes iniciais, utilizando a comunicação serial para salvar arquivos em um computador, só foi possível obter taxas de, no máximo, 60 amostras por segundo (60Hz). A suspeita da causa dessa limitação era comunicação serial entre o computador e o arduino. Essa hipótese foi confirmada durante os testes realizados com o armazenamento dos dados no cartão SD. Após a eliminação da transmissão via interface serial, foi possível atingir taxas de até 120Hz. A partir de então, os dados foram armazenados definitivamente no cartão de memória.

Antes do uso do módulo de micro SD para o armazenamento dos dados, várias técnicas foram tentadas para otimizar a leitura do módulo de aceleração, tais como (a) o uso de *threads* (processamento paralelo), (b) a leitura da aceleração do eixo Z, ao invés de todos os eixos, (c) o uso de tempos de espera controlados entre as leituras e (d) os laços dedicados à leitura de dados. Durante esses testes, observou-se que forçar um tempo de espera de cerca de 10 milissegundos entre cada leitura tornava a execução do código mais estável.

Além disso, a etapa de armazenamento dos dados no cartão SD apresentou instabilidade para salvar arquivos com nomes diferentes a cada acionamento do protótipo através da utilização de um arquivo contador de referência. Foi descoberto que essa instabilidade se devia à quantidade de caracteres do nome escolhido para os arquivos quando se utilizou caracteres especiais e que não eram reconhecidos. Alterando-se os caracteres e quantidade, o módulo funcionou de modo estável.

### **3. SOBRE O GPS**

A implementação do código de leitura do módulo de GPS representou o maior desafio no desenvolvimento do protótipo.

Durante os primeiros testes, procurou-se ler os dados obtidos pelo GPS também através de uma comunicação serial entre o Arduino e um computador. Nesta configuração, eram exibidos os dados referentes à leitura do GPS na tela do computador e não gravados em algum cartão de memória. Esses testes foram realizados no ambiente interno de um laboratório na Universidade Federal do Ceará.

Nessa fase do processo, o módulo de GPS demorava muito para entrar em funcionamento. A causa do que se julgava como mau funcionamento do módulo só foi detectada nas consultas às especificações do fabricante e em fóruns especializados nesses módulos. Posteriormente, constatou-se que o módulo de GPS apresentava dificuldades para estabelecer um canal de comunicação com satélites dos quais iria obter os dados de localização devido ao fato de os testes terem sido realizados em um ambiente *indoor*. Nos testes realizados em ambientes externos, o módulo de GPS também apresentou instabilidade.

Para os testes de consistência do *software*, a dificuldade foi solucionada posicionando-se o dispositivo próximo a uma janela. Então, foram necessários cerca de quinze minutos para se estabelecer a conexão com o satélite. Depois de estabelecida a primeira conexão, as próximas ocorriam quase que instantaneamente. No entanto, o problema da demora de conexão acontecia novamente se o módulo de GPS permanecesse desligado por um período superior a 1h.

Para auxiliar o usuário quanto ao funcionamento do módulo de GPS durante o uso em campo, foi necessário uma forma de indicar se a conexão com o satélite foi estabelecida. A solução foi a utilização de um *LED* (diodo emissor de luz) que piscava sempre que houvesse uma conexão estabelecida entre o módulo de GPS e um ou mais satélites.

Devido à complexidade das informações obtidas, que são transmitidas via satélite e processadas por um dispositivo de poder computacional limitado, a aquisição dos dados do GPS chegou a ser 100 vezes menor que a do acelerômetro. Assim, há uma incompatibilidade quando se tenta associar uma leitura de GPS a cada leitura de aceleração. Acontecia, então, de o módulo de GPS ditar a frequência de leitura dos dados do sistema como um todo. Isso reduziu consideravelmente a taxa de amostragem de leitura do acelerômetro a ponto de tornar inviável a utilização na aplicação proposta, pois a taxa obtida com o GPS estava em torno de 1Hz.

Para solucionar esse problema, tentou-se realizar uma medida de GPS a cada 60 medidas de acelerômetro. Entretanto, como essas medidas são feitas de forma sequencial, o atraso durante a leitura do GPS persistiu.

A alternativa adotada foi paralelizar o processamento, mas o *hardware* do arduino não permite uma paralelização virtual, apenas o uso de *threads*, que são diferentes linhas de execução dentro do mesmo programa que alternam sequencialmente entre si. Com essa solução, uma linha de execução do *software* processa as aquisições de dados de aceleração enquanto outra, executada em intervalos de tempo pré-estabelecidos, processa as aquisições de dados de geolocalização. Porém, o uso de *threads* gerou instabilidade na execução do código, pois a *thread* do GPS precisa realizar testes de disponibilidade de satélites próximos, que não acabavam sendo completadas.

Esgotadas as alternativas usando um único Arduino, optou-se por uma abordagem utilizando um segundo microcontrolador dedicado exclusivamente para o GPS, com um módulo de cartão SD e uma fonte de energia própria, alcançando assim um paralelismo real.

Assim, enquanto um arduino lia e armazenava os dados de aceleração, o outro microcontrolador, também ativado pelo sinal do mesmo potenciômetro, lia e armazenava os dados do GPS num segundo cartão SD. A associação dos dados de aceleração e de geolocalização seria feita na etapa de processamento dos dados.

Entretanto, essa abordagem também apresentou dificuldades técnicas. Devido a causas não identificadas na fase de testes, o módulo de GPS apresentou grande instabilidade durante o armazenamento de dados. Dada essa situação, não foi possível a utilização da mesma lógica de criação de arquivos utilizada no módulo acelerômetro. Assim, após uma primeira leitura de dados, o microcontrolador não conseguiu criar um novo arquivo a partir do arquivo contador de referência.

A solução adotada para esse problema do armazenamento dos dados em arquivos distintos foi criar um único arquivo e inserir os dados lidos nele. Em cada medição, os dados de leituras diferentes dentro de um mesmo arquivo seriam diferenciados por um número de identificação. No caso do acelerômetro, cada leitura gerava um arquivo diferente.

#### **4. COMPATIBILIZAÇÃO DOS MÓDULOS DE ACELERAÇÃO E GPS**

Os dois módulos possuem em comum a leitura do mesmo sinal do potenciômetro, que é utilizado para controlar o início e fim de cada leitura. O potenciômetro foi adotado em detrimento do botão, pois ele foi julgado mais estável que o botão.

Entretanto, em alguns momentos o sinal ativava apenas um dos módulos, deixando o outro em um estado inconsistente. Esse problema, ocorrido em alguns testes, foi resolvido reiniciando o sistema pelo uso dos botões de *reset* dos arduinos.

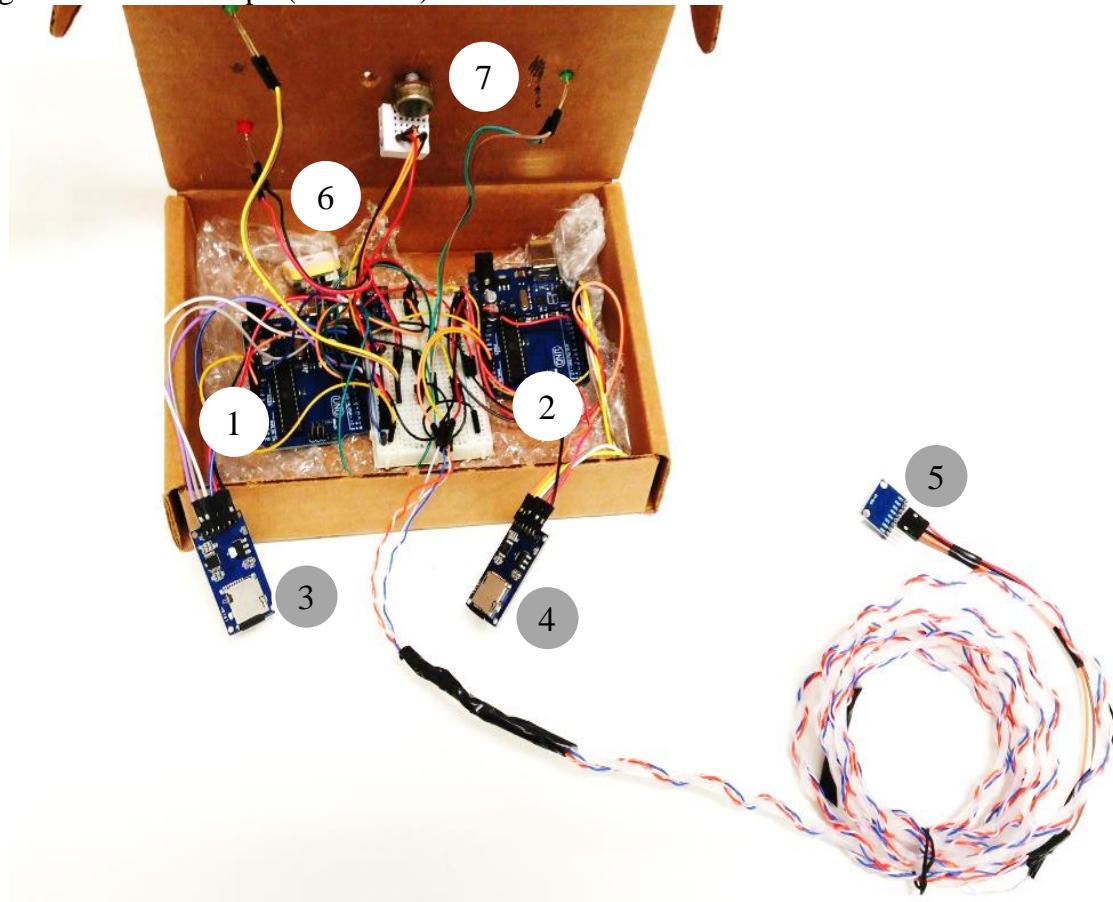
Além disso, durante os testes utilizando uma bateria de 9V como fonte de alimentação elétrica, os módulos não funcionaram de modo estável, possivelmente, devido a uma baixa carga da bateria. Para evitar esse problema, a alimentação do sistema desta primeira versão foi feita através do cabo USB alimentado por uma bateria externa de 5V e 1A.

## 5. ARQUITETURA DO PROTÓTIPO (1<sup>a</sup> VERSÃO)

O sistema foi composto de dois microcontroladores, um módulo de GPS e um módulo acelerômetro (Figura 72), cada qual contando com um cartão SD para armazenar seus respectivos dados de forma paralela. Os dois arduinos funcionaram de modo independente e acionados simultaneamente por um mesmo potenciômetro.

Quanto ao funcionamento do acelerômetro, os dados de aceleração do eixo Z foram capturados e armazenados em um arquivo de texto em um cartão micro SD. Quando o sistema estava alimentado eletricamente e o potenciômetro estava desligado, rotacionado para sentido anti-horário, o módulo permanecia realizando leituras, mas sem armazenar os dados obtidos. Quando o potenciômetro era girado no sentido horário até sua posição final, o referido módulo era ativado e, então, era criado um arquivo de texto com um nome relacionado ao número total de arquivos criados.

Figura 73 – O Protótipo (1<sup>a</sup> Versão)



Fonte: Elaborada pelo autor

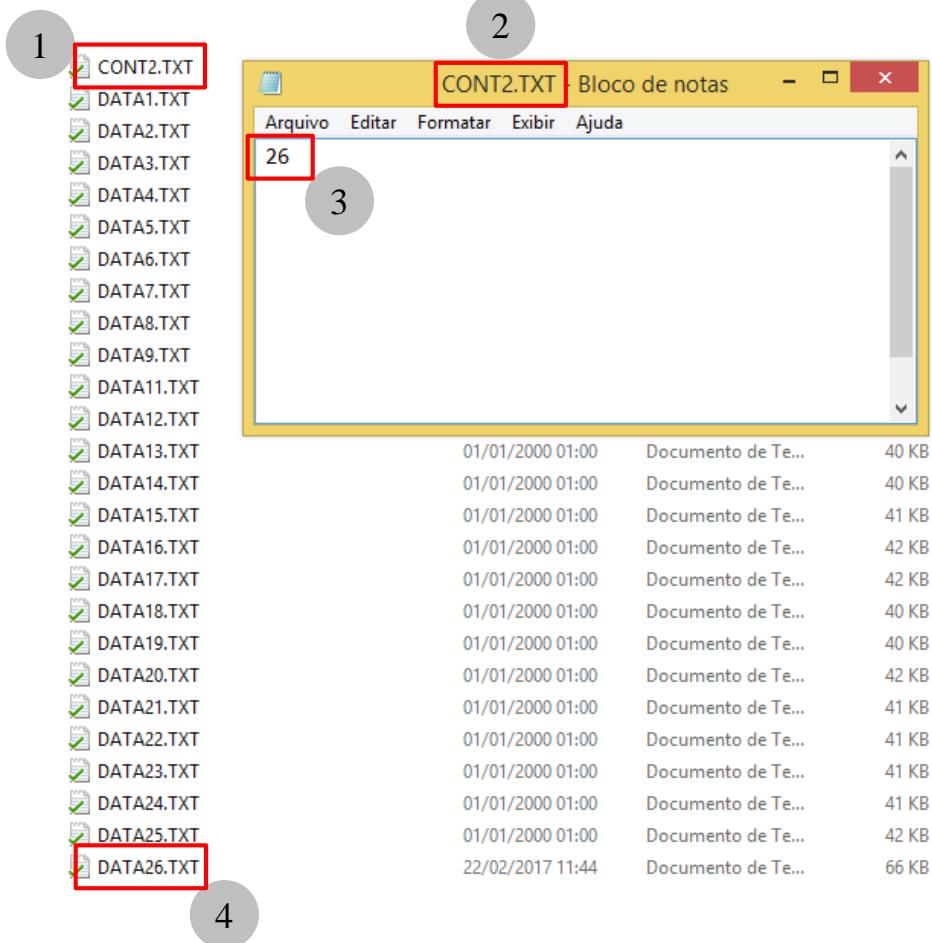
Os números indicam, respectivamente:

- 1 → Arduino (GPS);
- 2 → Arduino (Acelerômetro);
- 3 → Módulo de armazenamento de dados (GPS);
- 4 → Módulo de armazenamento de dados (Acelerômetro);
- 5 → Módulo de Aceleração (Acelerômetro);
- 6 → Módulo de GPS;
- 7 → Potenciômetro.

No cartão de memória existia um arquivo cujo conteúdo era um número definido pelo usuário, preferencialmente, números baixos (1, 2, 3...). Esse era o arquivo contador de referência, que o sistema deve abrir, fazer a leitura do seu conteúdo e incrementa esse conteúdo a cada criação de um novo arquivo. Se o novo arquivo fosse criado e aberto com sucesso, os dados passam a ser armazenados nele enquanto o potenciômetro for mantido na

posição referente à obtenção dos dados. A Figura 74 apresenta a sequência para a criação e nomeação de um arquivo de dados de aceleração.

Figura 74 - Sequência para a criação de um arquivo de dados



Fonte: Elaborada pelo autor

Os números indicam, respectivamente:

1 → Arquivo contador;

2 → Arquivo contador aberto;

3 → Conteúdo do arquivo contador;

4 → Nome do arquivo composto pela palavra Data acrescida ao conteúdo do arquivo contador. Esses arquivos contêm os dados de aceleração obtidos pelo módulo de aceleração e gravados no cartão de memória pelo arduino.

Um LED verde era utilizado para indicar que a escrita de dados estava funcionando corretamente. Caso o LED não acenda, é sinal de que ocorreu algum problema. Nessa situação, o sistema deve ser reiniciado (botão *reset* do arduino). Quando o

potenciômetro é girado no sentido anti-horário, a escrita de dados termina, o arquivo é fechado e armazenado no cartão SD.

Cada vez que o potenciômetro for ativado, um novo arquivo será criado de acordo com essa lógica. No final de cada arquivo, constam informações de desempenho, como o tempo total em segundos que durou a medição, o número de amostras por obtidas e a taxa de amostragem. Nos testes realizados durante o desenvolvimento do protótipo, as taxas obtidas ficaram por volta de 90 amostras por segundo (90Hz). A Figura 75 apresenta os dados de aceleração gravados em um arquivo.

Figura 75 – Conteúdo do arquivo gerado pelo arduino

The screenshot shows a Windows Notepad window with the title 'DATA26.TXT - Bloco de notas'. The content is a table of data followed by performance metrics:

1	2	3
AcZ	15948	656
AcZ	30432	652
AcZ	-1760	660
AcZ	-25836	656
AcZ	-27232	656
AcZ	10444	660
AcZ	29764	656
AcZ	7896	660
AcZ	-32768	652
AcZ	-29624	652
AcZ	2364	660
AcZ	11728	656
AcZ	-11380	660
AcZ	-31972	656
AcZ	1424	656

Below the table are three performance metrics:

- Total time in seconds: 30.00 → 4
- Number of samples: 2682 → 5
- Samples per second: 89.40 → 6

Fonte: Elaborada pelo autor

Os números indicam, respectivamente:

1 → Informação sobre o eixo do acelerômetro. No caso, eixo Z;

2 → Valores de aceleração obtidos pelo acelerômetro. Esses dados são lidos em função de um valor constante (16384) que corresponde a  $9,81\text{m/s}^2$  (1Gravidade) e pode variar de -32768 a 32768 (-2G a 2G);

3 → Intervalo de tempo entre uma leitura e outra de aceleração (ms);

4 → Duração total do ensaio (em s);

5 → Número de amostradas coletadas;

6 → Taxa de obtenção de dados (amostras por segundo).

Quanto ao GPS, diferente do módulo acelerômetro, era criado um único novo arquivo a cada vez que o equipamento era ligado (não a cada medição). Considerava-se que o módulo de GPS estava ligado quando ele estava alimentado eletricamente. Nesse caso, os dados de diferentes medições eram armazenados no mesmo arquivo, diferenciando-se através de um número identificador de leitura. Isto se deveu às inconsistências explicadas nas dificuldades encontradas.

Quando o potenciômetro estava posicionado na direção do sentido anti-horário, o módulo de GPS apenas lia os dados de GPS, sem escrever em um arquivo. Um LED vermelho foi utilizado para indicar que a conexão do GPS com os satélites foi estabelecida com sucesso e que a leitura estava funcionando. Evidentemente, a escrita de dados em arquivo só podia ser feita após o GPS conectar-se com os satélites e começar a receber dados, o que em algumas situações poderia levar vários minutos, conforme mencionado anteriormente.

Após o LED vermelho do GPS acender, o potenciômetro poderia ser girado no sentido horário, iniciando-se o processo de abertura do arquivo a escrita dos dados. Além dos dados do GPS, que incluíam localização (latitude e longitude), data, hora, nível do mar e velocidade, também era armazenado o número indicador de leitura da medição.

Quando o potenciômetro era girado em sentido anti-horário, a escrita de dados cessava, o arquivo era fechado e o número indicador de referência era incrementado. Na próxima leitura, o mesmo arquivo seria aberto e os dados seriam escritos nele, mas possuiriam um identificador diferente.

A taxa de amostras desse módulo era de cerca 1Hz, bem mais lenta que a do módulo acelerômetro, como dito anteriormente. Desta forma, durante a etapa de processamento de dados foi necessário associar uma leitura de GPS com um bloco de leituras de acelerômetro, aproximadamente, 100 amostras.