



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL  
– MESTRADO –**

**AVALIAÇÃO DO CONFORTO EM INFRAESTRUTURAS  
CICLOVIÁRIAS COM BASE EM IRREGULARIDADE  
LONGITUDINAL, VIBRAÇÕES MEDIDAS POR SMARTPHONES E  
PERCEPÇÕES DOS CICLISTAS**

*Por*

*Antonio Dias de Lima Terceiro Neto*

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba  
para obtenção do grau de Mestre*

**João Pessoa – Paraíba**

**Março de 2020**



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL  
– MESTRADO –**

**AVALIAÇÃO DO CONFORTO EM INFRAESTRUTURAS  
CICLOVIÁRIAS COM BASE EM IRREGULARIDADE  
LONGITUDINAL, VIBRAÇÕES MEDIDAS POR SMARTPHONES E  
PERCEPÇÕES DOS CICLISTAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

**Antonio Dias de Lima Terceiro Neto**

**Orientador: Prof. Dr. Ricardo Almeida de Melo**

**João Pessoa – Paraíba**

**Março de 2020**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

L732a Lima Terceiro Neto, Antonio Dias de.

Avaliação do conforto em infraestruturas cicloviárias com base em irregularidade longitudinal, vibrações medidas por smartphones e percepções dos ciclistas / Antonio Dias de Lima Terceiro Neto. - João Pessoa, 2020.

105 f. : il.

Orientação: Ricardo Almeida de Melo.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Infraestrutura cicloviária. 2. Vibração. 3. Smartphone. 4. Irregularidade longitudinal. 5. Conforto. I. Melo, Ricardo Almeida de. II. Título.

UFPB/BC

CDU 624 (043)

***"AVALIAÇÃO DO CONFORTO EM INFRAESTRUTURAS CICLOVIÁRIAS COM BASE EM  
IRREGULARIDADE LONGITUDINAL, VIBRAÇÕES MEDIDAS POR SMARTPHONES E  
PERCEPÇÕES DOS CICLISTAS"***

**ANTONIO DIAS DE LIMA TERCEIRO NETO**

**Dissertação aprovada em 31 de março de 2020**

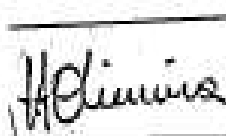
**Período Letivo: 2019.2**



**Prof. Dr. Ricardo Almeida de Melo – UFPB  
Orientador**



**Prof. Dr. Geovany Jessé Alexandre da Silva – UFPB  
Examinador Interno**



**Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira – UFC  
Examinador Externo**

**João Pessoa/PB  
2020**



*Dedico ao meu pai, Geraldo Dias (in memoriam), que não está entre nós, mas nunca será esquecido e sei que está orgulhoso aonde estiver; E à minha mãe, Maria Neumy, essa guerreira, por sempre estar presente e batalhar dia a dia para me ver feliz.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado a oportunidade de chegar ao fim dessa longa caminhada, por me levantar quando estava nos piores momentos, pela saúde que me proporcionou todo esse tempo não interrompendo os meus sonhos, pela força que me mantém de pé a cada dia e pela fé que nunca me deixou cair. Obrigado meu Deus pela vida.

Agradeço em especial ao meu orientador, Ricardo Almeida de Melo, pela sua dedicação, contribuição teórica, compreensão nas horas necessárias, paciência nos momentos difíceis, enfim, pela sua disponibilidade em todos os momentos de necessidade.

Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro.

Agradeço à minha família pelo amor, incentivo e apoio incondicional que nunca me faltou, mesmo com a distância entre nós. Meus sinceros agradecimentos à minha Mãe Neumy, meu Pai Geraldo (*in memoriam*), minha Avó Joana, minha Tia Elianna, meu Tio Sales, minha Tia Neury, minha Irmã Cristina, meu Afilhado Guilherme e minha Prima Joalice.

Agradeço à minha namorada Johranna, pela compreensão nesses últimos meses, pelo companheirismo, carinho e por todo amor.

Aos companheiros de laboratório, que são nossa família no ambiente acadêmico, Maísa, Camila, Ingridy, Pedro, Vinícius e Sérgio.

Agradeço aos amigos que fiz no mestrado, em especial a Célia, Aurélia e Regiane.

Agradeço de coração a todos que me ajudaram com os levantamentos e possibilitaram a realização dessa pesquisa, Professor Ricardo, Professor Pablo, Gabriel, Luana, Aline, Késsia, Ângelo, João, Moacy e Jonathan Costa.

Enfim, sou grato a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para realização desse trabalho.

## RESUMO

A utilização da bicicleta, como meio de transporte, vem crescendo, e, desse modo, é importante o Poder Público ampliar e manter a infraestrutura cicloviária em boas condições. Diante disso, é importante realizar periodicamente avaliações para identificar o estado atual e definir estratégias de intervenções, visando manter um nível de qualidade aceitável, pois vias deterioradas podem desencorajar o uso da bicicleta. Entretanto, a literatura mostra que as avaliações realizadas são predominantemente subjetivas, dependendo estritamente da opinião dos avaliadores, de modo que existe uma lacuna sobre avaliações objetivas em infraestruturas cicloviárias. Neste sentido, esta pesquisa teve como objetivo utilizar medidas físicas para avaliar o conforto em infraestruturas cicloviárias de forma prática, confiável e com baixo custo. Para isso, foram coletadas medidas de irregularidade longitudinal dos pavimentos com o equipamento *Machine for Evaluating Roughness Using Low-cost Instrumentation* (MERLIN), medidas de aceleração vertical com aplicativos pré-instalados em um *smartphone* fixado em uma bicicleta e, por fim, foi realizada uma avaliação subjetiva com ciclistas, tratando sobre o conforto na infraestrutura cicloviária. Os dados obtidos passaram por análises estatísticas que permitiram o estabelecimento de escalas de conforto em termos de *International Roughness Index* (IRI) e *Root Mean Square* (RMS), com base na percepção dos ciclistas, possibilitando enquadrar a infraestrutura em um intervalo entre “Extremamente desconfortável” (0) e “Extremamente confortável” (5). Foi verificada uma correlação entre a irregularidade longitudinal, a vibração e a avaliação subjetiva com coeficientes  $R^2$  ajustados em torno de 0,90; assim um pavimento mais irregular causa maiores vibrações e é mais desconfortável. Pôde-se constatar que os ciclistas tendem a não aceitar as infraestruturas cicloviárias com IRI acima de 6,74 m/km e com RMS acima de 3,1 m/s<sup>2</sup>, valores que podem servir como gatilho para intervenções de manutenção e reabilitação. Após, as escalas encontradas com o método foram aplicadas para avaliar um trecho de ciclovia da cidade de João Pessoa-PB, das quais foram obtidos mapas de conforto, o que possibilitou uma melhor visualização das condições atuais da ciclovia. Por fim, conclui-se que medidas de irregularidade longitudinal e de vibração, e mapas de conforto podem auxiliar a tomada de decisão dos planejadores de transportes e dos administradores, quanto às intervenções necessárias para manter a qualidade do passeio para os ciclistas, incentivando indiretamente o uso da bicicleta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Infraestrutura cicloviária, Vibração, *Smartphone*, Irregularidade longitudinal, Conforto.

## ABSTRACT

The use of bicycles, as a means of transport, has been growing, and, therefore, it is important for the Government to expand and maintain cycling infrastructures in good conditions. Therefore, it is important periodically to carry out evaluations to identify the current condition and define intervention strategies, aiming to maintain an acceptable level of quality, because deteriorated roads can discourage bicycling. However, the literature shows that evaluations are predominantly subjective, depending strictly on opinion of evaluators, therefore there is a gap on objective evaluations for bicycle infrastructures. In this sense, this research aimed to use physical measures to assess comfort in bicycle infrastructure in a practical, reliable and low cost way. For this, roughness measurements of pavements were collected with the Machine for Evaluating Roughness Using Low-cost Instrumentation (MERLIN) equipment and vertical acceleration measures with pre-installed applications in a smartphone fixed on a bicycle and, finally, a subjective evaluation was carried out with cyclists, dealing with comfort on cycling infrastructure. The statistical analyze carried out with collected data allowed an establishment of comfort scales in terms of the International Roughness Index (IRI) and the Root Mean Square (RMS), based on the perception of cyclists, making it possible to fit infrastructure evaluation in an interval between “Extremely uncomfortable” (0) and “Extremely comfortable” (5). There was a correlation between roughness, vibration and subjective evaluation with adjusted coefficient  $R^2$  around 0.9; thus, rougher pavement causes greater vibrations and is more uncomfortable. It can be seen that cyclists do not tend to accept bicycle infrastructure with IRI above 6.74 m/km and with RMS above 3.1 m/s<sup>2</sup>, values that can serve as a trigger for maintenance and rehabilitation interventions. Afterwards, the scales found with the method were applied to evaluate a stretch of bicycle path in the city of João Pessoa-PB, from which comfort maps were obtained, which allowed a better visualization of the current conditions of the bicycle path. Finally, it can be concluded that measures of roughness and vibration, and comfort maps can support the decision making of transport planners and administrators, regarding the interventions necessary to maintain the quality of ride for cyclists, and indirectly encouraging bicycling.

**KEYWORDS:** Bicycle infrastructure, Vibration, Smartphone, Roughness, Comfort.

## SUMÁRIO

### RESUMO

### ABSTRACT

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

### LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	3
1.2	QUESTÕES DA PESQUISA .....	5
1.3	OBJETIVOS .....	6
1.3.1	<i>Objetivo Geral</i> .....	6
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i> .....	6
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	7
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>8</b>
2.1	INFRAESTRUTURA CICLOVIÁRIA .....	8
2.1.1	<i>Ciclovias</i> .....	9
2.1.2	<i>Ciclofaixas</i> .....	10
2.1.3	<i>Vias compartilhadas</i> .....	11
2.2	MOBILIDADE URBANA E PLANEJAMENTO CICLOVIÁRIO NO BRASIL .....	11
2.3	BENEFÍCIOS DO USO DA BICICLETA .....	13
2.4	AVALIAÇÃO DA INFRAESTRUTURA CICLOVIÁRIA .....	14
2.4.1	<i>Avaliações subjetivas</i> .....	16
2.4.2	<i>Avaliações objetivas</i> .....	17
2.4.2.1	<i>Processamento dos sinais</i> .....	22
2.5	IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS .....	22
2.5.1	<i>MERLIN</i> .....	26
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
3.1	MATERIAIS .....	29
3.2	MÉTODOS .....	34
3.2.1	<i>Definição da área de estudo</i> .....	36
3.2.2	<i>Levantamento da irregularidade longitudinal com o MERLIN</i> .....	39
3.2.3	<i>Medidas de vibração com Smartphones</i> .....	42
3.2.4	<i>Avaliação subjetiva com os ciclistas</i> .....	45
3.2.5	<i>Tratamento estatístico e análise dos dados</i> .....	46
3.2.6	<i>Mapas de Conforto e comparação com a ISO 2631-1 (1997)</i> .....	47
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>48</b>
4.1	ÁREA DE ESTUDO .....	48
4.2	LEVANTAMENTO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL COM O MERLIN .....	53

4.3	MEDIDAS DE VIBRAÇÃO COM <i>SMARTPHONES</i> .....	55
4.4	AVALIAÇÃO SUBJETIVA COM OS CICLISTAS .....	58
4.5	TRATAMENTO ESTATÍSTICO E ANÁLISE DOS DADOS .....	59
4.5.1	<i>Comparação entre as bicicletas</i> .....	59
4.5.2	<i>Comparação entre os aplicativos</i> .....	61
4.5.3	<i>Correlação</i> .....	64
4.5.4	<i>Gráficos de dispersão</i> .....	64
4.5.5	<i>Regressão linear</i> .....	66
4.5.6	<i>Definição das escalas de conforto</i> .....	70
4.5.6.1	Escala de conforto em termos de RMS .....	70
4.5.6.2	Escala de conforto em termos de IRI.....	73
4.6	MAPAS DE CONFORTO E COMPARAÇÃO COM A ISO 2631-1 (1997) .....	74
4.6.1.1	Estudo de caso com valores de IRI.....	75
4.6.1.2	Estudo de caso com valores de RMS.....	76
4.6.1.3	Comparação com a ISO 2631-1 (1997).....	78
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>80</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de uma ciclovia unidirecional e bidirecional segregadas por meio de blocos (GEIPOT, 2001).	9
Figura 2 - Possibilidade de configuração de ciclofaixas (GEIPOT, 2001).	10
Figura 3 - Sistema de medição de vibração (NUÑEZ, 2018).	19
Figura 4 – Desenho esquemático do MERLIN (CUNDILL, 1996 adaptado por BARELLA 2008).	26
Figura 5 – Equipamento MERLIN utilizado na pesquisa.	29
Figura 6 – Bicicletas utilizadas na pesquisa.	30
Figura 7 – Suporte utilizado para fixar o <i>smartphone</i> nas bicicletas.	31
Figura 8 – Exemplo de medição com <i>Acclerometer analyzer</i> .	31
Figura 9 – Sistema de coordenadas de um <i>smartphone</i> (BISCONSINI, 2016).	32
Figura 10 – Exemplo de medição com o <i>AndroSensor</i> .	32
Figura 11 – Orientações para a avaliação subjetiva.	33
Figura 12 – Perguntas para a avaliação subjetiva.	34
Figura 13 – Fluxograma do método.	35
Figura 14 – Mapa territorial e localização geográfica de João Pessoa.	36
Figura 15 - Plano cicloviário de João Pessoa-PB (SEMOB, 2019).	37
Figura 16 – Alinhamento do MERLIN.	40
Figura 17 - Calibração do MERLIN: a) Equipamento apoiado; b) Equipamento e bloco de metal; c) Bloco de metal sob a sonda.	40
Figura 18 – Teste do equipamento.	41
Figura 19 – Levantamento com o MERLIN.	42
Figura 20 – Sistema de medição da vibração.	43
Figura 21 – Área de Estudo.	48
Figura 22 - Trecho V1.	49
Figura 23 - Trecho J3.	50
Figura 24 - Trecho H2.	50
Figura 25 - Trecho P3.	51
Figura 26 - Trecho A1.	52
Figura 27 - Trecho C1.	52
Figura 28 - Trechos B2 e B1.	53
Figura 29 - Aplicação do filtro de média móvel.	56
Figura 30 - Aceleração vertical para as duas bicicletas no trecho H1.	60
Figura 31 - RMS nas ciclofaixas.	60
Figura 32 - RMS nas ciclovias.	61
Figura 33 - Gráficos de dispersão entre as variáveis.	65
Figura 34 - Modelo de regressão linear entre as variáveis no software R.	66
Figura 35 - Método da normalidade para verificação dos modelos.	68
Figura 36 - Gráficos dos resíduos <i>versus</i> valores ajustados para verificação dos modelos.	69
Figura 37 - Tabelas de frequências obtidas com o R para os valores de RMS e IRI.	70
Figura 38 - Boxplot entre valores de RMS e a Avaliação Subjetiva.	71
Figura 39 - Aceitabilidade dos trechos em termos de RMS.	72
Figura 40 - Boxplot entre valores de IRI e a Avaliação Subjetiva.	73
Figura 41 - Aceitabilidade dos trechos em termos de IRI.	74
Figura 42 - Mapa de conforto em termos de IRI.	76
Figura 43 – Mapa de conforto em termos de RMS.	77

Figura 44 - Mapa de conforto para a escala da ISO 2631-1 (1997). .....	78
--	----



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Reações devido a vibração, segundo a ISO 2631-1 (1997). .....	20
Tabela 2 – Classificação do pavimento em termos de IRI (DNIT, 2006). .....	24
Tabela 3 – Características das bicicletas utilizadas na pesquisa. ....	30
Tabela 4 - Infraestrutura cicloviária de João Pessoa (SEMOB, 2019). .....	38
Tabela 5 – Características do ciclista. ....	44
Tabela 6 – IRI para as ciclovias. ....	54
Tabela 7 – IRI para as ciclofaixas. ....	54
Tabela 8 – Exemplo do nivelamento do <i>smartphone</i> . ....	55
Tabela 9 – RMS para as ciclovias. ....	57
Tabela 10 – RMS para as ciclofaixas. ....	57
Tabela 11 – Notas dos avaliadores para as ciclofaixas. ....	58
Tabela 12 – Notas dos avaliadores para as ciclovias. ....	59
Tabela 13 – RMS nas ciclofaixas com o <i>AndroSensor</i> . ....	62
Tabela 14 – RMS nas ciclofaixas com o <i>Accelerometer Analyzer</i> . ....	62
Tabela 15 – Amostra de aceleração do trecho A1. ....	63
Tabela 16 – Correlação entre as variáveis. ....	64
Tabela 17 – Predição das notas dos ciclistas com valores de RMS. ....	71
Tabela 18 – Escala de conforto de infraestruturas cicloviárias em termos de RMS. ....	72
Tabela 19 - Predição das notas dos ciclistas com valores de IRI. ....	73
Tabela 20 – Escala de conforto de infraestruturas cicloviárias em termos de IRI. ....	74
Tabela 21 – Valores de IRI no estudo de caso. ....	75
Tabela 22 – Valores de RMS no estudo de caso. ....	76

## LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ANTP	Associação Nacional de Transportes Públicos
ASTM	<i>American Society of Testing and Materials</i>
BEQI	<i>Bicycle Environmental Quality Index</i>
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
DCC	<i>Dynamic Cycling Comfort</i>
DCI	<i>Dynamic Comfort Index</i>
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
GEIPOT	Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IRI	<i>International Roughness Index</i>
ISO	<i>International Standards Organization</i>
ITDP	Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento
MERLIN	<i>Machine For Evaluating Roughness Using Low-Cost Instrumentation</i>
M&R	Manutenção e Reabilitação
ONU	Organização das Nações Unidas
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
PPS	<i>Pavement Profile Scanner</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
Rs	Rúpias indianas
SEMOB	Superintendência Executiva de Mobilidade Urbana
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SFDPH	<i>San Francisco Department of Public Health</i>
TRL	<i>Transportation Research Laboratory</i>

# 1 INTRODUÇÃO

O transporte ciclovitário vem crescendo muito nos últimos anos e tem se tornado uma alternativa atraente no ambiente urbano, visto que é um meio de transporte de emissão zero, diminui congestionamentos e a poluição sonora, que são problemas comuns nas áreas mais urbanizadas. Além disso, é uma atividade física, reverte problemas de mobilidade urbana pela priorização do automóvel e tem um custo relativamente baixo quando comparado aos outros modos de transporte, sendo assim preferido por muitas pessoas, principalmente em deslocamentos de curta distância (5 km).

Em virtude dessa crescente no uso da bicicleta é necessário que sejam investidos mais recursos nas infraestruturas ciclovitárias, tanto na implantação, quanto na manutenção das já existentes, visando proporcionar condições adequadas para os usuários, o que incentiva o uso desse modo de transporte. De acordo com Kamargianni (2015), o transporte ciclovitário necessita de alguns estímulos, como a disposição de sistemas ciclovitários em locais adequados para ser inserido em ambientes urbanos e aumentar a utilização da bicicleta. Pucher e Buehler (2007) colocam que o sucesso do ciclismo como modo de transporte depende também das condições da infraestrutura, dado que a segurança e o conforto são essenciais para atrair novos usuários.

Conforme Nuñez (2018), os planejadores de transportes precisam avaliar as condições de conforto e estresse dos usuários em infraestruturas ciclovitárias, uma vez que situações de adversas podem desencorajar o uso deste modo de transporte não-motorizado e sustentável. Entretanto, mesmo com a importância que esse tipo de transporte tem ganhado, ainda falta uma atenção na sua gerência, sendo dada priorização ao planejamento para a implantação de novas infraestruturas. Desse modo, é preciso ter um olhar especial para as atividades de manutenção no decorrer da sua vida útil, para que as infraestruturas ciclovitárias não se tornem precárias, desestimulando o uso da bicicleta e acarretando um custo alto para o poder público devido a uma intervenção tardia.

Tendo isso em vista, surge a necessidade de um sistema de gerência que busca avaliar e conservar a infraestrutura ciclovitária dentro de um nível de qualidade aceitável. Para isso, esse tipo de infraestrutura deve ser monitorado constantemente por meio de avaliações sobre o seu estado atual. A partir dessas, identifica-se a condição da infraestrutura, o que torna possível o estabelecimento de estratégias de manutenção, visando proporcionar mais conforto, segurança e economia para os usuários. Outra

vantagem das avaliações recorrentes é a garantia aos gestores da alocação correta dos recursos envolvidos, os quais estão cada vez mais escassos.

Muitos estudos buscaram identificar os fatores mais importantes que influenciam no uso do transporte cicloviário e no seu conforto, por meio de medidas subjetivas, que dependem estritamente das opiniões dos usuários (KIRNER e SANCHES, 2008; SFDPH, 2009; PROVIDELO e SANCHES, 2010 e 2011; FERNÁNDEZ-HEREDIA *et al.*, 2014; SEGADILHA e SANCHES, 2014; AYACHI *et al.*, 2015; CALVEY *et al.*, 2015; MAGALHÃES *et al.* 2015; CAMPOS e BARROS, 2016). No entanto, ainda existe uma lacuna relacionada às avaliações objetivas das condições das infraestruturas cicloviárias, as quais são pouco exploradas pelos pesquisadores.

Dessa forma, há a necessidade de estudar avaliações objetivas para utilização em infraestruturas cicloviárias, as quais podem inserir medidas físicas relacionadas ao conforto no ciclismo e garantir um padrão mínimo de qualidade, sem depender das opiniões dos avaliadores, o que muitas vezes pode mascarar a realidade. Jie *et al.* (2018) relatam que a obtenção do conforto no ciclismo em ambientes urbanos encoraja as pessoas a usarem as bicicletas com mais frequência, trazendo benefícios sociais e ambientais.

Segundo Torbic *et al.* (2003), os ciclistas percebem as vibrações no ciclismo de forma negativa, portanto, a medição direta da vibração deve ser aplicada à rede cicloviária. Petrone e Giulibato (2013) expõem que a influência do pavimento no conforto do ciclismo reflete-se na intensidade da vibração de acordo com a percepção dos ciclistas. Logo, é notório que a vibração e as condições do pavimento influenciam diretamente no conforto percebido pelos ciclistas, podendo ser utilizadas como condicionantes para a avaliação objetiva da qualidade das infraestruturas cicloviárias.

As medições das vibrações para avaliar o conforto em infraestruturas cicloviárias já foram tratadas em muitos estudos (PARKIN e ROTHERAM, 2010; VANWALLEGHEM *et al.*, 2012; LEBLANC *et al.*, 2014; MACDERMID *et al.*, 2014; MEYER *et al.*, 2016; ROSEIRO *et al.*, 2016; KATO *et al.*, 2017; TAKAHASHI *et al.*, 2018). De acordo com Chou *et al.* (2015), essa medida pode ser realizada com a instalação de um ou vários acelerômetros em diferentes partes da bicicleta, como o guidão, a sela ou o garfo. Contudo, estudos recentes têm verificado a utilização de sensores presentes em *smartphones* para obter a vibração no ciclismo. Todavia, Jie *et al.* (2018) explanam que ainda não foi estabelecida uma correlação abrangente entre a percepção de conforto dos ciclistas e a vibração de ciclismo no conhecimento atual.

A irregularidade longitudinal do pavimento é pouco tratada em estudos sobre o conforto no ciclismo, embora seja um parâmetro que explica bem a condição geral que se encontra a superfície de rolamento. Para Waleed *et al.* (2018), a condição funcional de um pavimento pode ser medida pelo *International Roughness Index* (IRI), o qual é considerado um parâmetro crítico dessa estrutura, pois afeta o conforto, a segurança e a economia dos usuários.

Portanto, estudou-se nesta pesquisa a possibilidade da utilização de medidas de irregularidade longitudinal, levantadas com o equipamento *Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumentation* (MERLIN), e de vibrações provenientes de *smartphones* para avaliar a qualidade das infraestruturas cicloviárias, motivado pelo fato de serem simples, práticos e de baixo custo, as quais foram confrontadas com a percepção de ciclistas sobre o conforto.

## **1.1 Justificativa**

A cada dia que passa, o mundo tem se tornado cada vez mais urbano, cujas cidades comportam mais da metade da população do planeta, com um total de 3,5 bilhões de pessoas. Portanto, necessita-se de um planejamento urbano que vise o desenvolvimento integrado e sustentável no mundo, como também no universo urbano brasileiro, este com mais de 160 milhões de habitantes (SILVA e ROMERO, 2013).

Os transportes em geral são utilizados no deslocamento de pessoas e cargas de um lugar para o outro, sendo que são um ponto estratégico no desenvolvimento dos países e das sociedades. Dessa forma, à medida que as cidades vão crescendo, ocorre uma pressão maior no sistema de transportes, o qual deve se adequar para atender as demandas.

Devido ao crescimento acelerado das cidades e a alta urbanização, surgem problemas como o espraiamento e a dispersão urbana, caracterizados pela formação de vazios na mancha urbana e no aumento das distâncias de deslocamentos. Logo, existe uma priorização por automóveis, trazendo diversos pontos negativos ambientais, sociais e econômicos, como: emissões de gases de efeito estufa, esgotamento de combustíveis fósseis, aumento dos congestionamentos, problemas de estacionamento, acidentes de trânsito, poluição sonora, baixa qualidade de vida da população, entre outros.

De acordo com a ANTP (2015), com base em dados de 438 municípios brasileiros com população acima de 60.000 habitantes, houve, entre o período de 2003 a 2013, um aumento de 28,3% na emissão de poluentes do efeito estufa decorrentes do uso dos

automóveis. Já dados do IPEA (2015) mostram que o custo estimado dos acidentes de trânsito nas cidades brasileiras no ano de 2015 foi de aproximadamente R\$ 10 bilhões. Martins e Rodrigues da Silva (2019) colocam que a falta de investimentos em modos ativos de transportes e em tecnologias de substituição aos combustíveis fósseis torna as condições ainda mais preocupantes.

Dessa maneira, o transporte cicloviário surge como alternativa para diminuição da utilização do automóvel nos ambientes urbanos, tendo impacto positivo na mobilidade e acessibilidade urbana, na zero emissão de gases, na diminuição da poluição sonora, no alívio de congestionamentos e diminuição de acidentes, e na qualidade de vida da população, além de ser uma atividade física e ter um menor custo quando comparado aos automóveis.

É bem reconhecido que o ciclismo é um meio de transporte desejável por muitas razões, incluindo ser amigo do ambiente, rentável, uma maneira de se manter em forma e saudável e, em muitas ocasiões, associado a uma atividade social agradável (ZHANG *et al.*, 2015). Como coloca Karmargianni (2015), nas últimas décadas, as transformações climáticas e o risco de esgotamento dos recursos naturais têm trazido à tona a importância de projetos voltados aos modos de transporte não motorizados.

Contudo, as cidades, por meio de seus administradores, devem oferecer infraestruturas cicloviárias em condições adequadas para atender os ciclistas, o que pode ser feito pelo planejamento correto na implantação de novas infraestruturas e na manutenção das já existentes. Segundo Hsu e Lin (2011), o desenvolvimento de um modelo abrangente para o planejamento de uma rede cicloviária, que vise reduzir a pegada de carbono, será um dos primeiros desafios profissionais na promoção do uso de bicicletas no futuro.

Entretanto, o foco principal dos estudos observados na literatura é o planejamento inicial. Então, é preciso que exista um sistema de gerência de infraestruturas cicloviárias que venha a acompanhá-las durante toda a sua vida útil, estabelecendo métodos de avaliações e estratégias de manutenções, que visem prolongar o desempenho e proporcionar condições de conforto, segurança, economia e qualidade de vida para os usuários. Nunez *et al.* (2018) comentam que uma tarefa crucial enfrentada pelas secretarias municipais é desenvolver um método eficaz para avaliar a infraestrutura cicloviária.

Os métodos de avaliações são preponderantemente subjetivos, os quais dependem da opinião de quem está avaliando. Dessa forma, os resultados desse tipo de avaliação

podem variar muito, uma vez que a opinião das pessoas quanto às condições da infraestrutura avaliada pode ser diferente. Já as avaliações objetivas apresentam medidas físicas de algum aspecto que se pretende avaliar, sem depender da opinião do avaliador. Esse tipo de avaliação pode retratar melhor as condições das infraestruturas cicloviárias.

Portanto, diante do que foi exposto, esta pesquisa trata de um tema atual e que deve ser estudado, justificando-se pela necessidade de inserir avaliações objetivas sobre conforto em infraestruturas cicloviárias, uma vez que essas podem retornar com mais clareza a condição atual que se encontram as infraestruturas, possibilitando identificar os segmentos que precisam de maior atenção de acordo com a sua criticidade. Conforme Dorey e Guastavino (2011), apesar do interesse substancial, o conforto para os ciclistas permanece pouco explorado na literatura científica.

Esse estudo pode trazer benefícios tanto para a sociedade nos seus deslocamentos diários, quanto para os administradores públicos na tomada de decisão e na otimização dos recursos, pois facilitará o monitoramento e possibilitará a realização de manutenções no período correto, proporcionando infraestruturas em melhores condições para os ciclistas. Além disso, pode diminuir indiretamente os impactos ambientais resultantes do uso massivo do automóvel, já que infraestruturas com melhores condições incentivam o uso da bicicleta pela população. Como coloca Guerreiro (2016), somente as políticas públicas não são suficientes para estimular o uso da bicicleta, é necessário garantir segurança, conforto e rapidez aos deslocamentos por este modo.

## **1.2 Questões da pesquisa**

Diante do que foi exposto, surgem as seguintes questões:

- a) É possível utilizar medidas físicas para avaliar as infraestruturas cicloviárias?
- b) Os smartphones retornam dados consistentes de aceleração vertical e podem ser usados para medir vibração?
- c) Existe diferença entre os resultados obtidos com aplicativos e bicicletas diferentes?
- d) A irregularidade longitudinal do pavimento pode ser usada para avaliar as infraestruturas cicloviárias e medir o conforto no ciclismo?
- e) Existe relação entre a irregularidade longitudinal, vibração e a percepção de conforto dos ciclistas?
- f) Quais valores de irregularidade longitudinal do pavimento e de vibração são aceitáveis no ciclismo?

### 1.3 Objetivos

A seguir, são apresentados os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

#### 1.3.1 *Objetivo Geral*

Analisar a viabilidade da inserção de avaliações objetivas com medidas de irregularidade longitudinal e vibração para estimar as condições de conforto em infraestruturas cicloviárias de forma prática, confiável e com baixo custo.

#### 1.3.2 *Objetivos Específicos*

- a) Desenvolver uma forma prática e de baixo custo para avaliar as infraestruturas cicloviárias com medidas de irregularidade longitudinal com o uso do equipamento MERLIN e de vibrações provenientes de *smartphones*;
- b) Verificar a viabilidade de utilização das tecnologias presentes nos *smartphones* para a medição da vibração sofrida pelos ciclistas ao utilizar a bicicleta;
- c) Verificar qual o melhor aplicativo para obter a aceleração vertical e qual a bicicleta que causa mais desconforto ao ciclista, dentre os testados nesta pesquisa;
- d) Verificar a influência da irregularidade longitudinal do pavimento sobre o conforto do ciclista em infraestruturas cicloviárias;
- e) Estabelecer uma escala de conforto no ciclismo com base em medidas de irregularidade longitudinal e vibração, possibilitando a classificação das infraestruturas cicloviárias;
- f) Gerar mapas de conforto da rede cicloviária com o auxílio de um Sistema de Informação Geográfica (SIG);
- g) Possibilitar o monitoramento da infraestrutura cicloviária constantemente, ajudando os planejadores de transportes a tomar decisões viáveis e otimizar o uso dos recursos disponíveis.



## **1.4 Estrutura do Trabalho**

Além deste capítulo introdutório, que contém uma breve abordagem sobre o tema em estudo, assim como justificava, hipóteses da pesquisa e objetivos, esta Dissertação encontra-se dividida em mais quatro capítulos, descritos a seguir.

O Capítulo 2 apresenta o Referencial Teórico, contendo uma breve revisão do estado da arte sobre os temas abordados na pesquisa e as definições necessárias para o seu desenvolvimento.

O Capítulo 3 descreve os Materiais e Métodos utilizados no trabalho para o alcance dos objetivos estipulados.

O Capítulo 4 apresenta os Resultados e Discussões encontrados após a coleta e análise dos dados com a aplicação do método proposto.

O Capítulo 5 apresenta as Conclusões tiradas com base nas análises dos resultados e no conhecimento adquirido a partir da revisão de literatura, bem como proposições para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, apresentam-se os principais aspectos relacionados à infraestrutura cicloviária e seus tipos, à mobilidade urbana e o planejamento cicloviário no Brasil, ao uso da bicicleta e seus benefícios, às avaliações das infraestruturas cicloviárias, à utilização de *smartphones* para medição da vibração e o processamento desses sinais, à irregularidade longitudinal dos pavimentos e os equipamentos que podem ser utilizados. Para isso, foram consultados livros, normas técnicas, artigos de congressos e periódicos, teses e dissertações relacionadas ao tema, com vista a fundamentar o presente trabalho.

### 2.1 Infraestrutura cicloviária

Conforme o Código de Trânsito Brasileiro (BRASIL, 1997), a circulação de bicicletas pode ocorrer nos bordos da pista de rolamento, sempre no mesmo sentido de circulação permitido para a via e com preferência à circulação dos veículos automotores. Tais deslocamentos apenas deverão ser realizados nos bordos da pista, caso não haja ciclovia, ciclofaixa ou acostamento.

De maneira geral, a infraestrutura para a circulação de bicicletas nas cidades é formada por ciclovias, ciclofaixas, vias compartilhadas, como também as vias congestionadas, onde os ciclistas se arriscam em meios aos outros veículos. Com relação à ciclovia e à ciclofaixa, além da faixa de circulação, a infraestrutura é composta por elementos que têm o objetivo de facilitar o uso e a acomodação da bicicleta no espaço urbano, podendo ser citados também os estacionamentos e bicicletários (LAGE, 2017).

De acordo com GEIPOT (2001) a estruturação de uma infraestrutura destinada à circulação de bicicletas, pode ser dividida em três sistemas distintos:

- Sistema Cicloviário Compartilhado: cuja bicicleta circula em vias com baixo volume de tráfego motorizado e elevado nível de segurança. As vias podem ser adaptadas ou não à circulação de bicicletas, constituindo assim rotas cicláveis;
- Sistema Cicloviário Preferencial: a bicicleta circula em espaços exclusivos, tais como ciclovias e ciclofaixas, sendo que as vias devem ter sido adaptadas conforme as medidas moderadoras de “*traffic calming*”;
- Sistema Cicloviário de Uso Misto: combina trechos de vias compartilhados entre bicicleta e tráfego motorizado e vias exclusivas para bicicleta. É o sistema

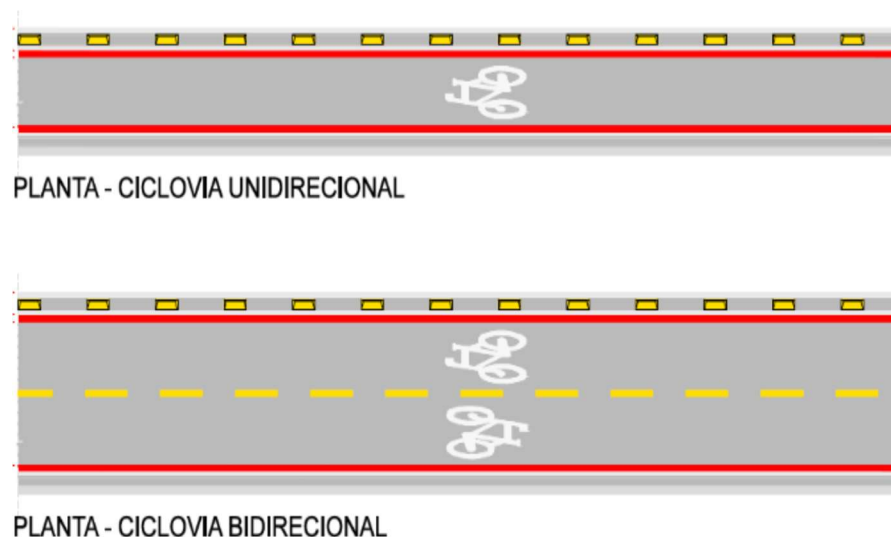
que apresenta maior facilidade para implantação nas cidades, visto sua maior flexibilidade em relação aos outros dois sistemas.

Na cidade de João Pessoa-PB, onde foi desenvolvida esta pesquisa, observa-se, na infraestrutura existente, a predominância do Sistema Ciclovitário de uso misto, cujos trechos são resultado de uma combinação entre vias compartilhadas e vias exclusivas, sendo que essas últimas são em sua maioria ciclofaixas.

### 2.1.1 Ciclovias

O Código de Trânsito Brasileiro (BRASIL, 1997) define ciclovias como uma pista separada fisicamente do tráfego automotor, na qual é permitido somente o tráfego de bicicletas. Rodrigues da Silva *et al.* (2012) definem de forma mais ampla, colocando que além da circulação exclusiva de bicicletas (tráfego segregado), normalmente a ciclovias é mais elevada do que a faixa de rolamento destinada ao tráfego motorizado, pode estar localizada tanto ao longo do canteiro central, como também nas calçadas, e pode possuir uma configuração independente do sistema viário.

As ciclovias podem ser unidirecionais ou bidirecionais, sendo a largura efetiva dependente do volume de tráfego contabilizado em uma hora. No caso das pistas unidirecionais, a largura efetiva varia entre 2,00 e 6,00 metros e no caso das pistas bidirecionais, entre 2,50 e acima de 6,00 metros (GEIPOT, 2001). Exemplos de ciclovias podem ser observados na Figura 1.

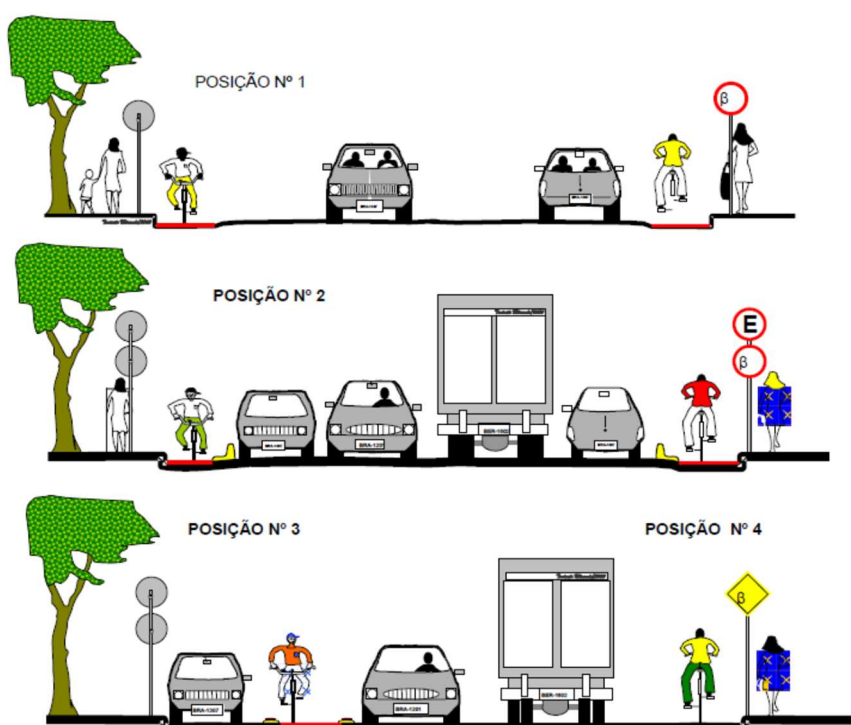


**Figura 1** - Esquema de uma ciclovias unidirecional e bidirecional segregadas por meio de blocos (GEIPOT, 2001).

### 2.1.2 Ciclofaixas

Diferentemente da Ciclovia, a Ciclofaixa faz parte da pista destinada ao tráfego motorizado, entretanto é exclusiva para a circulação de bicicletas, o que nem sempre é respeitado. De acordo com GEIPOT (2001) pode ser separada da pista de rolamento por sinalização horizontal e/ou dispositivos delimitadores, deve ser sempre unidirecional, possuir largura efetiva mínima de 1,20 m e, na aproximação dos cruzamentos, quando possível, ser canalizada.

Existem quatro possibilidades de configurações de ciclofaixas, como pode ser visto na Figura 2, todas dependentes da possibilidade ou não de existência de estacionamento junto ao meio fio.



**Figura 2** - Possibilidade de configuração de ciclofaixas (GEIPOT, 2001).

A configuração mais recomendada é a posição 1, aquela na qual a ciclofaixa localiza-se junto ao meio fio, no bordo direito de uma via, cujo estacionamento de automóveis é proibido ao longo de sua extensão. Na segunda posição a ciclofaixa situa-se entre o bordo do meio fio e a faixa de estacionamento. Outra configuração possível, apresentada na posição 3, estabelece a ciclofaixa entre a faixa de estacionamento e a faixa de rolamento presentes na via. A última posição é indicada para vias que apresentam

sobrelargura da faixa de rolamento, permitindo que a bicicleta se acomode na faixa excedente, aumentando a segurança do ciclista.

Como pode ser observado, a posição 2 e a 3 expõem os ciclistas a um risco eminente de acidentes devido às operações de embarque e desembarque, abertura da porta dos veículos estacionados ou à entrada e saída dos automóveis das vagas de estacionamento.

### **2.1.3 Vias compartilhadas**

Como alternativa, tem-se vias sem segregação, nas quais o tráfego é compartilhado entre automóveis e bicicletas, entretanto, a velocidade dos veículos deve ser baixa para que não se configure em um obstáculo ao uso da bicicleta. De acordo com GEIPOT (2001), em alguns casos, também é possível compartilhar com segurança e tranquilidade o espaço dedicado ao ciclista com cadeirantes e pedestres, através da implantação de “Ciclo Redes”.

## **2.2 Mobilidade urbana e planejamento ciclovitário no Brasil**

O mundo está cada vez mais urbano, de acordo com o *Department of Economic and Social Affairs* (2018) da ONU, a população urbana mundial já supera os 55%, marca de transição urbana que foi superada pelo Brasil em meados de 1960. Essa tendência da população se concentrar em ambientes urbanos provoca um crescimento desordenado das cidades, caracterizado por uma dispersão urbana, a qual é um dos principais problemas encontrados nos grandes centros.

A dispersão urbana é definida por um avanço além dos limites da mancha urbana, invadindo áreas verdes e deixando o espaço urbano cheio de vazios. Consequentemente, ocorre um aumento nas distâncias e surge a necessidade da utilização do transporte automotivo, que eleva as emissões de gases de efeito estufa. Segundo Ojima e Marandola Junior (2016), esse processo está intrinsecamente ligado ao uso massivo de automóveis particulares. De acordo com estudo realizado por Moraes *et al.* (2012), considerando dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) para o ano de 2009, quase metade dos domicílios brasileiros (47%) possuíam automóveis ou motocicletas.

Essa priorização do uso do automóvel nas cidades tem gerado sérios problemas de transporte e de falta de qualidade de vida, causados principalmente pela deterioração da mobilidade e acessibilidade urbana, cuja carência de infraestrutura viária em muitas

capitais não atende à demanda dos automóveis particulares e públicos existentes, tornando o sistema ineficiente e sujeito a longos congestionamentos (SEGADILHA, 2014). Kirner (2006) ainda coloca que os grandes centros urbanos apresentam sérios problemas relacionados aos transportes, o que provoca a degradação das condições ambientais, congestionamentos crônicos e altos índices de acidentes de trânsito.

Devido ao caos no trânsito, é preciso que as políticas de transportes abordem e priorizem outros modos, focando principalmente no transporte não-motorizado e sustentável, que é o caso da bicicleta. Conforme o Ministério das Cidades (2007), a bicicleta é um modo de transporte amigo do meio ambiente e acessível a todos, dessa maneira, algumas cidades vem inserindo-a como um meio de transporte alternativo e a população vem usando cada vez mais. Ao se locomover por meio da bicicleta, o cidadão interage mais com o espaço urbano, colabora para a redução da emissão de gases e gasta menos com transportes.

Com o crescente uso do transporte ciclovitário por parte da população, o poder público deve proporcionar condições que favoreçam o seu uso, implantando mais infraestruturas ciclovitárias, como também trabalhando na manutenção das existentes. Como afirma Agarwal *et al.* (2019), a bicicleta é um modo de transporte de baixo carbono, no entanto, a infraestrutura insuficiente ou não planejada leva à diminuição da sua participação em muitas cidades dos países em desenvolvimento. Logo, como a bicicleta ainda é tratada como “novidade” no Brasil, isso resulta em poucas políticas públicas realmente capazes de estimular o seu uso como modo de transporte.

Apesar do Estatuto da Cidade (Lei Federal nº 10.257/2001) ter definido em 2001 a obrigatoriedade das cidades com mais de 500 mil habitantes terem um Plano Diretor de Transportes, até agora, não se tornou usual essa prática. Em abril de 2012, a Lei da Mobilidade Urbana (Lei Federal nº 12.587/2012) entrou em vigor e uma de suas disposições era a exigência de cidades com mais de 20 mil habitantes elaborarem Planos de Mobilidade Urbana até abril de 2015, sob pena de não receberem investimentos federais na área de transportes. Porém, nem mesmo com estas obrigatoriedades o planejamento da mobilidade urbana efetivou-se nas cidades do país (CÉSAR, 2014).

Sobre as políticas públicas brasileiras que tem como foco principal o uso da bicicleta, pode-se citar: Programa Bicicleta Brasil da Secretaria Nacional de Transportes e da Mobilidade Urbana, Caderno de Referência para Elaboração de Plano de Mobilidade por Bicicletas nas Cidades, Cartilha do Ciclista do Ministério das Cidades, Caderno

Técnico para Projetos de Mobilidade Urbana (Transporte Ativo), Programa Avançar Cidades e as Leis acima mencionadas.

O Programa Bicicleta Brasil tem o intuito de estimular os governos municipais a implantar sistemas cicloviários, promover a sua integração com os transportes públicos e apresentar um conjunto de ações que garantam a segurança de ciclistas nos deslocamentos urbanos. Já o Caderno de Referência para Elaboração de Plano de Mobilidade por Bicicletas nas Cidades se propõe a fornecer subsídios para os municípios que têm intenção de implantar um plano cicloviário, trazendo diretrizes para o projeto das infraestruturas, exemplos de boas práticas e procedimentos, em geral, para elaboração do plano de mobilidade por bicicleta.

A Cartilha do Ciclista por sua vez, incentiva o uso da bicicleta e dá dicas para pedalar “tranquilo”. O Caderno Técnico para projetos de Mobilidade Urbana estabelece critérios gerais para a implantação de infraestrutura adequada (calçadas, ciclovias e ciclofaixas), que garanta segurança e acessibilidade a todas as pessoas. Por fim, o Programa Avançar Cidades apoia ações de mobilidade urbana com foco na melhoria da circulação das pessoas nas cidades e da qualidade do transporte público coletivo.

Para mostrar a importância do incentivo do poder público, pode-se citar a pesquisa realizada por Kearns *et al.* (2019), que estudaram a influência de programas de orientação sobre o ciclismo. Como resultado do estudo, observaram que os ciclistas estavam mais cientes sobre as regras da estrada, os programas foram eficazes no aumento do ciclismo como transporte, independente da distância, e que o aumento da disponibilidade da infraestrutura de ciclismo provavelmente melhoraria os resultados.

### **2.3 Benefícios do uso da bicicleta**

De acordo com o Ministério das Cidades (2007), a infraestrutura cicloviária é composta por uma rede integrada de ciclovias, ciclofaixas e vias compartilhadas que interligam polos geradores de viagens. Essa rede deve proporcionar segurança, rapidez, constância, conforto e atratividade para os usuários, atendendo às necessidades de deslocamentos nas áreas urbanas.

Segundo Nuñez *et al.* (2018), o crescente interesse em tipos de transporte de emissão zero, como o ciclismo, está gerando atualmente motivação e necessidade de construir novas ciclovias. Para Jie *et al.* (2018), a utilização das bicicletas com mais

frequência pela população traz benefícios sociais e ambientais, pois melhora a qualidade do ar, alivia congestionamentos e reduz as emissões de carbono. Zhang *et al.* (2015), ainda colocam que é uma maneira de se manter em forma e saudável, associado a uma atividade social agradável.

A bicicleta ainda é um meio de transporte de baixo custo, possui capacidade de ampliar o acesso da população às oportunidades de trabalho, lazer, equipamentos públicos e serviços existentes nas cidades. Outro fator importante é que ela traz benefícios à saúde, diminui a incidência de doenças relacionadas ao sedentarismo e ajuda a melhorar as condições gerais de vida da população. Sua inserção na matriz de transportes colabora com a qualidade ambiental, reduzindo emissões de gases de efeito estufa e poluentes locais. Além disso, ajuda a promover laços de solidariedade e cidadania ao facilitar o contato dos cidadãos com o território e com os demais habitantes (ITDP, 2014).

Monari (2018) cita que os benefícios sociais trazidos por esse tipo de transporte fazem com que a bicicleta se apresente como uma solução interessante para a diminuição dos problemas ocasionados pelo uso intensivo do automóvel como, por exemplo, congestionamentos e poluição atmosférica.

Em estudo realizado por Rahul e Verma (2013) foram identificados os benefícios econômicos da redução de congestionamento, poluição do ar e de custos de acidentes com a substituição do automóvel pela bicicleta. Foi encontrada uma economia de 250.000 Rupias Indianas (Rs) em uma suposta mudança de 1% dos viajantes para o modo não motorizado em um único dia. Já em relação a poluição do ar e ao risco de acidentes, verificou-se uma economia 1611,4 Rs./dia.

Conforme Pucher *et al.* (2009), apesar de todos esses benefícios, ainda se estuda como aumentar a utilização da bicicleta como transporte urbano, sendo que uma das desvantagens no Brasil, é o fato da sociedade julgar o uso da bicicleta como uma característica da população de baixa renda, de acordo com Tucker e Manaugh (2016).

## **2.4 Avaliação da infraestrutura ciclovária**

O conforto é definido como um estado de bem estar em condições ótimas, sendo diferente de uma pessoa para outra e dependente da situação. De acordo com Slater (1985), o conforto é um estado de harmonia entre o homem e o ambiente em três dimensões: fisiológica, psicológica e física. Trazendo este conceito para o ciclismo, Henri *et al.* (1998)



e Too (1990) colocam que três áreas distintas contribuem para o conforto ao andar de bicicleta: fatores ambientais, mecânicos e biomecânicos e fatores fisiológicos, como por exemplo a bicicleta, a segurança, a geometria, a condição do pavimento, o clima, a sinalização, o entorno, entre outros. Portanto, esses fatores são importantes para se avaliar nas infraestruturas ciclovárias.

Núñez *et al.* (2018) comentam que uma tarefa crucial enfrentada pelas secretarias de infraestrutura é desenvolver um método eficaz para avaliar a infraestrutura ciclovária, abordando critérios de conforto, de modo que os resultados possam ser usados para informar sobre as necessidades de manutenção e permitir que os ciclistas selecionem suas rotas preferidas. Isso traria benefícios para os planejadores, na alocação dos recursos públicos, como também para os usuários, na disponibilidade de ciclovias mais seguras e confortáveis.

Um ambiente favorável à bicicleta é fundamental para aumentar o seu uso, pois os ciclistas são frequentemente ameaçados por várias situações perigosas, como colisões, riscos de acidentes e quedas. O primeiro passo para proporcionar ambientes mais seguros e confortáveis seria identificar as condições atuais, monitorando a mobilidade por bicicleta (JOO *et al.*, 2015).

As avaliações são de suma importância em qualquer sistema de gerência, pois oferecem as condições necessárias para a tomada de decisão quanto às intervenções que venham a melhorar o estado atual da infraestrutura, sendo que essas devem ser realizadas no tempo correto para evitar uma deterioração maior e automaticamente um gasto superior ao poder público.

De acordo com Prashant e Sachin (2018), o custo de reconstrução é, em sua maioria, alto em comparação com o trabalho de manutenção, de modo que a manutenção é preferida principalmente nos países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil. Se a manutenção não for feita, a vida útil da infraestrutura/pavimento será reduzida e isso afetará diretamente o custo.

Algumas pesquisas desenvolvidas no âmbito de projeto e avaliação de ciclovias, consideram tanto a qualidade do serviço, quanto a condição da superfície do pavimento relacionada ao conforto, sendo essa última ainda pouco abordada. Dentre esses estudos, pode-se citar: SFDPH (2009); Olieman *et al.* (2012); Gomes e Savionek (2014); Fernández-Heredia *et al.* (2014); Segadilha e Sanches (2014); Calvey *et al.* (2015); Bil *et*

*al.* (2015); Ayachi *et al.* (2015); Magalhães *et al.* (2015); Campos e Barros (2016); Ambrož (2017) e Jie *et al.* (2018).

#### 2.4.1 Avaliações subjetivas

As avaliações subjetivas são caracterizadas pelas opiniões dos avaliadores em relação a determinado parâmetro. Por dependerem exclusivamente da percepção de quem avalia, os resultados podem diferir de um para outro, como por exemplo, um ciclista mais experiente pode considerar um trecho deteriorado mais confortável do que um ciclista que não pedala frequentemente, partindo assim da interpretação das suas necessidades individuais. Portanto, esse tipo de avaliação tem um caráter mais subjetivo. A seguir, são apresentados alguns tipos de avaliações subjetivas em infraestruturas cicloviárias.

O SFDPH (2009) desenvolveu um método subjetivo para avaliar a infraestrutura cicloviária, tendo como base a avaliação visual por um observador treinado que qualifica as condições gerais do ambiente em torno das ciclovias, o que resulta no *Bicycle Environmental Quality Index* (BEQI). Tal índice utiliza 22 indicadores, os quais são analisados como agente incentivador ou desencorajador no uso da bicicleta. Este é um método consolidado, muito utilizado mundialmente, que adota um conceito de valores dedutíveis, cujo BEQI varia de 1 a 100, sendo que o valor mais alto significa uma melhor condição.

Segadilha e Sanches (2014) utilizaram o GPS e questionários para avaliar as rotas utilizadas por ciclistas, cujos fatores identificados como os mais importantes foram: número de caminhões e ônibus, volume e velocidade do tráfego, iluminação pública, segurança e qualidade do pavimento. Fernández- Heredia *et al.* (2014) estudaram sobre as atitudes e percepções dos ciclistas, com a finalidade de quantificar a influência de diferentes fatores na decisão de escolha pelo modo cicloviário em viagens pendulares, de acordo com pesquisas feitas em estudos recentes. Já Calvey *et al.* (2015) elaboraram um questionário para identificar os fatores mais importantes entre 24 indicadores referentes aos aspectos do ambiente no ciclismo, tendo com resultado os seguintes fatores: tipo de pavimento, irregularidade e condição.

Ayachi *et al.* (2015) realizaram uma pesquisa *online* sobre conforto no ciclismo que envolveu 244 ciclistas residentes no Canadá, Estados Unidos, França, Suíça, Austrália e

África do Sul. Os resultados indicaram que o conforto é baseado principalmente na qualidade da bicicleta, infraestrutura e condições externas, como clima e temperatura.

Campos e Barros (2016) aplicaram uma pesquisa junto a ciclistas com o objetivo de identificar quais eram suas rotas usuais e quais os parâmetros mais importantes para escolha de uma determinada rota nos seus deslocamentos diários. Ao fim do estudo, apresentaram uma metodologia para planejamento de um sistema cicloviário, servindo como base para órgãos municipais na implantação destes sistemas visando fomentar o uso da bicicleta como forma alternativa de transporte diário ao trabalho e por motivo estudo.

Portanto, de acordo com as pesquisas atuais, nota-se que os ciclistas consideram que a condição do pavimento influencia muito no conforto. Entretanto, existe uma lacuna sobre a falta de medidas objetivas que venham avaliar as condições da infraestrutura cicloviária, sem depender estritamente das opiniões dos ciclistas, as quais não deixam de ser importantes. Segundo Caviedes *et al.* (2017), esses tipos de pesquisas com caráter subjetivo, altamente dependente da opinião do participante, nem sempre refletem as respostas psicológicas e fisiológicas, e eventualmente podem ser tendenciosas.

#### 2.4.2 Avaliações objetivas

As avaliações objetivas têm como resultados medidas físicas de algum parâmetro avaliado, cujos valores podem ser utilizados para classificar a condição atual da infraestrutura cicloviária. A seguir são apresentadas algumas pesquisas que utilizaram avaliações objetivas e principalmente analisaram a vibração no ciclismo, relacionando-a ao conforto.

Holzel *et al.* (2012) compararam diferentes superfícies de pavimento (asfalto, concreto e paralelepípedos) através de um acelerômetro instalado na sela de uma bicicleta, verificando que o conforto diminui em altas velocidades e que o asfalto proporcionou o maior conforto. O autor ainda coloca que projetar ciclovias com um maior conforto é uma questão importante para convencer mais pessoas a usar a bicicleta.

Thigpen *et al.* (2015) e Wu *et al.* (2015) fizeram progressos no estudo da influência da superfície do pavimento na qualidade do ciclismo, demonstrando que o IRI, a trilha de roda e a vibração do passeio estão altamente relacionadas com o nível de conforto. De acordo com Jie *et al.* (2018), a vibração é percebida pelos ciclistas como um dos indicadores mais importantes do conforto e influencia muito a escolha das bicicletas pelas

peessoas. No entanto, uma correlação abrangente entre a percepção de conforto dos ciclistas e a vibração de ciclismo ainda não foi estabelecida no conhecimento atual.

Jie *et al.* (2018) desenvolveram um sistema para a avaliação de ciclovias, o *Dynamic Cycling Comfort* (DCC), o qual consiste em um acelerômetro, um GPS e um *smartphone*. Esses aparelhos foram instalados no guidão de uma bicicleta compartilhada, proveniente de um serviço de compartilhamento oferecido na China, para registrar os dados dinâmicos de vibração, rota, velocidade e distância percorrida, os quais foram correlacionados por meio de regressão com a percepção de vibração dos ciclistas obtida por questionários. O autor testou a consistência das respostas do questionário com o Alfa de *Cronbach*, que é calculado a partir de correlações entre os itens, concluindo que as respostas eram confiáveis, o que possibilitou a definição de limites de vibrações para o conforto ciclismo. O valor desse coeficiente varia entre 0 (não confiável) e 1 (perfeitamente confiável), sendo que alfas maiores que 0,7 indicam uma confiabilidade aceitável (DE VET *et al.*, 2017).

O Alfa de *Cronbach*, que também foi utilizado nessa pesquisa, pode ser calculado com a equação 1.

$$\alpha = \frac{K}{K-1} \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_{yi}^2}{\sigma_x^2} \right) \quad (1)$$

Em que:

$\sigma_x^2$ : variação das pontuações observadas nos testes;

$\sigma_{yi}^2$ : variação do componente *i* para a amostra;

*k*: número de perguntas.

Bíl *et al.* (2015) desenvolveram o *Dynamic Comfort Index* (DCI) para descrever as características de vibração da ciclovia com base nos sinais de aceleração coletados por uma bicicleta. Índice que pode ser usado, segundo o autor, por administradores de ciclovias para monitorar a qualidade da superfície do pavimento e por ciclistas na escolha da melhor rota.

De acordo com Ambrož (2017), os acelerômetros podem ser usados para determinar as características das vibrações nas ciclovias, as quais são muito importantes, pois interferem no conforto do usuário. Em vista disso, considerando que os *smartphones* possuem sensores de movimento que aliados a aplicativos pré-instalados podem retornar valores de aceleração, as medidas obtidas a partir desses aparelhos populares podem ser

utilizadas de forma prática para avaliar a qualidade das ciclovias em termos de vibração proveniente das irregularidades dos pavimentos.

Um exemplo deste tipo de medição pode ser observado na figura 3, a qual apresenta o sistema de medição de vibrações em ciclovias utilizado por Nuñez *et al.* (2018), cujos procedimentos de coleta de dados foram todos conduzidos diretamente em uma bicicleta. Para isso uma câmera de vídeo foi adaptada ao quadro da bicicleta, para ajudar a identificar os diferentes elementos distribuídos ao longo das ciclovias, e um *smartphone* foi fixado ao quadro da bicicleta, sob a sela, para registrar os valores de aceleração vertical e as vibrações associadas ao longo do caminho.



**Figura 3** - Sistema de medição de vibração (NUÑEZ, 2018).

A vibração é calculada de acordo com recomendações da norma ISO 2631-1 (1997), dada em termos de *Root Mean Square* (RMS) que pode ser calculado com a equação 2.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (2)$$

Em que:

$N$ : número de observações;

$X_i$ : valores de aceleração vertical coletados ao longo do caminho.

A norma ISO 2631-1 (1997) é um guia para avaliação da exposição humana às vibrações de corpo inteiro, definindo métodos para quantificá-la, informando quanto aos efeitos da vibração à saúde, ao conforto e a percepção. Pode-se encontrar nesta norma uma escala quanto ao conforto em relação aos níveis de vibração, como pode ser observado na tabela 1.

**Tabela 1 – Reações devido a vibração, segundo a ISO 2631-1 (1997).**

<b>RMS (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Reação provável</b>
Menor do que 0,315	Confortável
Entre 0,315 e 0,63	Pouco desconfortável
Entre 0,5 e 1	Razoavelmente desconfortável
Entre 0,8 e 1,6	Desconfortável
Entre 1,25 e 2,5	Muito desconfortável
Maior do que 2,5	Extremamente desconfortável

É importante destacar que a ISO 2163-1 (1997) foi desenvolvida para condições de automóveis, nas quais os usuários viajam sentados confortavelmente. Portanto, mais pesquisas devem ser feitas para levar em conta as condições gerais experimentadas pelos ciclistas (JIE *et al.*, 2018).

Um fator importante para esse teste é a escolha da bicicleta utilizada. De acordo com Petrone e Giubilato (2013), o tipo de bicicleta é um dos principais fatores que influenciam o nível de vibração do ciclismo. No estudo realizado por Jie *et al.* (2018), concluiu-se que bicicletas com estrutura mais robusta e pneus não infláveis (pneus sólidos) contribuem para uma vibração mais elevada.

Como pode-se notar, os *smartphones* têm grande potencial para apoiar a coleta de dados em estudos no ciclismo. Muitos estudos recentes vêm utilizando os acelerômetros de *smartphones* e câmeras de ação para coletar informações sobre a condição das infraestruturas cicloviárias. Essas medições podem ser usadas de forma simples e em grande quantidade para avaliar a qualidade das ciclovias em termos de condição do pavimento.

É relevante saber também que a utilização de *smartphones* para avaliar a condição do pavimento, principalmente a irregularidade, vem sendo estudada atualmente por vários pesquisadores também em rodovias, como é o caso de: Muliterno *et al.* (2019); Almeida *et al.* (2018); Waleed *et al.* (2018); Bisconsini *et al.* (2018); Bridgelall *et al.* (2017); Ramos

(2017); Zeng (2017); Bisconsini (2016); Islam *et al.* (2015); Hanson *et al.* (2014); Douangphachanh e Oneyama (2014). O levantamento consiste na coleta de sinais de aceleração vertical fornecidos por sensores de aceleração presentes no dispositivo, os quais são relacionados com as medidas de irregularidade das vias, que podem ser obtidas pelos métodos de medição tradicionais. Segundo Douangphachanh e Oneyama (2014), os dados dos acelerômetros de smartphones têm uma relação linear com a condição de irregularidade da via.

Waleed *et al.* (2018) usou um aplicativo *Android* chamado *AndroSensor* instalado em *smartphones* para coletar medidas de aceleração vertical em seu estudo, com frequência de amostragem de 200 Hz. O autor identificou que o tipo de *smartphone* utilizado parece ser um fator importante na medição das acelerações e que esses valores podem retornar IRI aceitáveis. O *AndroSensor*, aplicativo utilizado no estudo, é usado para registrar dados da maioria dos sensores de *smartphones*. Esta aplicação está disponível para *download* gratuito na *Google Play Store*.

Multierno (2019) utilizou *smartphones* equipados com acelerômetros para obter o IRI em pavimentos sobre pontes com base na aceleração vertical coletada com o auxílio do aplicativo *Accelerometer Analyzer*. Já Bisconsini (2016) utilizou os dois aplicativos, observando que o *Accelerometer Analyzer* permitiu uma taxa de aquisição maior e com menor repetição de dados. Observou-se também que houve uma redução significativa das falhas de atenuação dos picos de aceleração com o uso de maiores taxas de aquisição fornecidas pelo mesmo aplicativo.

Conforme Jie *et al.* (2018), atualmente, os *smartphones* estão integrando cada vez mais sensores, como acelerômetros e GPS. Esses sensores podem fornecer alguns dados necessários para estimar as condições da superfície do pavimento. Contudo, Belzowski e Ekstrom (2015) colocam que é importante ter cuidado na fixação do dispositivo, garantindo rigidez ao sistema, sem haver “flutuações” do aparelho.

Logo, pode-se observar que os *smartphones* são ferramentas de grande potencial para avaliar as condições das infraestruturas cicloviárias, devido aos seus diversos sensores, principalmente o acelerômetro. Este, pode ser usado para avaliar as vibrações e a qualidade do passeio, que está relacionada diretamente com a irregularidade e a condição geral do pavimento, sendo uma ferramenta que pode coletar uma grande quantidade de dados a um menor custo.

#### 2.4.2.1 Processamento dos sinais

O processamento é uma etapa importante quando se trabalha com sinais provenientes de acelerômetros, pois esses registram ruídos e erros de leitura, devido as possíveis flutuações do aparelho, aceleradas, freadas e curvas, podendo ser imprecisos nos seus resultados. Alessandroni *et al.* (2014) colocam que podem existir ruídos no sinal obtido pelos acelerômetros, os quais podem mascarar os dados.

Nunes *et al.* (2006) definem processamento de um sinal como a análise dos 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.

Para tratar esses sinais geralmente utiliza-se filtros, os quais separam informações significativas das não significativas, removendo ruídos e interferências indesejadas por meio da passagem inalterada de algumas frequências, enquanto bloqueia outras. Segundo Smith (1999), um exemplo de filtro passa-baixa é o média móvel, que é simples e pode ser usado no processamento de sinais.

Ramos (2017) e Muliterno (2019) usaram filtros de média móvel para processar os sinais de aceleração vertical captada com *smartphones*, utilizando janelas de 100 e 5 posições, respectivamente. O filtro de média móvel é aplicado com a equação 3. Tal filtro foi utilizado nesta pesquisa para o processamento dos dados coletados, por ser simples, de fácil uso e ser um dos mais utilizados conforme a literatura.

$$y(i) = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x(i+j) \quad (3)$$

Em que:

*M*: número de pontos considerados;

*i+j*: intervalo de dados considerados;

*x*: dados de entrada;

*y*: dados de saída.

## 2.5 Irregularidade longitudinal de pavimentos

O monitoramento dos pavimentos é de suma importância para verificar as causas e o agravamento de defeitos. A partir daí, escolhe-se a melhor estratégia para intervir de



maneira eficiente e garantir o conforto ao usuário. Uma das formas de avaliar o pavimento é através do levantamento da irregularidade longitudinal, o qual está descrito na norma DNER-PRO 164/94. Esta norma define irregularidade como o desvio da superfície em relação a um plano de referência, afetando a dinâmica do veículo, o conforto ao rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via. A norma americana que trata desse tema é a ASTM E1926/08 a qual acrescenta a drenagem como um fator afetado pela irregularidade.

Para Paéz (2015), o monitoramento constante visa minimizar os custos de Manutenção e Reabilitação (M&R) com os quais um pavimento é preservado em ótimas condições de funcionamento através do tempo. Assim, o gerenciamento se torna muito importante, pois o pavimento está em constante deterioração devido as intempéries ambientais e as solicitações do tráfego, e a sua atuação de forma eficiente pode programar intervenções na hora certa, minimizando custos. Este conceito também pode ser aplicado em para gerência de infraestruturas cicloviárias, pois elas são constituídas por pavimentos.

Dentre os defeitos monitorados por organismos rodoviários, a irregularidade longitudinal de pavimentos é tida como a mais importante em rodovias. Isso porque a irregularidade, representada pelo IRI, é um dos mais apropriados índices para a obtenção da qualidade de rolamento global (SAYERS e KARAMIHAS, 1998).

Robbins (2016) coloca que a irregularidade é um importante indicador de desempenho do pavimento, a qual reflete a condição do pavimento, a qualidade de passeio e o nível de conforto dos usuários. Portanto, nota-se que a irregularidade longitudinal pode ser um fator importante no ciclismo, já que pavimentos irregulares não oferecem conforto e nem segurança aos usuários.

De acordo com Gong *et al.* (2018), a irregularidade longitudinal é considerada pelo público o parâmetro mais crítico, em relação ao conforto e a serventia da via. Logo, assegurar um nível razoável de suavidade do pavimento permite que os usuários conduzam com conforto e segurança, mas isso requer monitoramento constante e a adoção de estratégias de manutenção adequadas quando necessário.

Segundo Ibrahim (2012), as rodovias mais regulares proporcionam conforto e segurança aos usuários, reduzem o custo operacional do veículo (combustível, desgaste dos pneus, manutenção) e reduzem os custos de manutenção do pavimento. De acordo com Paéz (2015), o DNIT sugere em suas normas de Especificações de Serviços que um pavimento novo deve ter uma irregularidade inferior a 2,70 m/km, o qual é considerado “Bom”. Entretanto, essas especificações são para pavimentos rodoviários, sem haver

nenhuma especificação para pavimentos cicloviários, sendo válido então, estudos das suas irregularidades relacionando-as ao conforto e a segurança no ciclismo.

Em 1982, o Banco Mundial, a fim de estabelecer uma medida de irregularidade padrão, patrocinou uma pesquisa que resultou no *International Roughness Index* (IRI). Conforme Gillespie (1992), o IRI é determinado medindo o perfil atual da estrada e depois processando-o através de um algoritmo matemático. Este algoritmo, conhecido como Simulação de um quarto de carro, simula a resposta de um veículo de referência viajando a 80 km/h. Shafizadeh *et al.* (2002) acrescentam que as deflexões de suspensão acumuladas do veículo de referência podem ser divididas pela distância do deslocamento para proporcionar um índice nas unidades de inclinação. A irregularidade pode ser classificada, em termos de IRI, com base na tabela 2 retirada do Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006).

**Tabela 2** – Classificação do pavimento em termos de IRI (DNIT, 2006).

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

Os equipamentos utilizados para medir a irregularidade longitudinal dos pavimentos são divididos em quatro classes, denominadas classes 1, 2, 3 e 4.

Os equipamentos da classe 1 são de alta precisão, pois medem o perfil do pavimento diretamente, partindo de cotas topográficas pouco espaçadas. Nesta classe, enquadram-se os equipamentos: TRRL *Beam*, Nível e Mira de precisão, *Dipstick*, ROMDAS z-250, ARRB *walking profilometer*.

O método Nível e Mira é regido pela norma DNER-ES 173/86. Bisconsini (2016) relata que esse método é o mais conhecido e disponível internacionalmente. Além disso, o autor completa dizendo que é um método demorado e trabalhoso, empregado geralmente na calibração de outros equipamentos, principalmente os medidores tipo-resposta que dependem de uma irregularidade de referência.

Os equipamentos da classe 2 realizam a medição sem contato direto com a superfície, chamados de perfilômetros, determinando a irregularidade com uma menor acurácia do que os da classe 1. Pode-se citar o *Pavement Profile Scanner* – PPS, o *APL Trailer* e o *GMRtype Inertial Profilometer*. De acordo com Hirpahuanca (2016), tanto os métodos de classe 1, como os de classe 2, determinam a irregularidade em termos de IRI fazendo uso de programas computacionais baseados em algoritmos matemáticos. Vale salientar que, segundo Ramos (2017), perfilômetros inerciais podem chegar a custar quase R\$ 400.000,00, inviabilizando a sua utilização em nível de rede e em países com poucos recursos.

Conforme Bisconsini (2016), o PPS utiliza apenas um sensor para medir o perfil transversal e longitudinal dos pavimentos, através de um feixe laser que trabalha em conjunto com um espelho, podendo escanear milhares de pontos por segundo. Segundo Herr (2004), trata-se de um equipamento de alta potência, sem similares, que varre o perfil transversal do pavimento em alta velocidade, enquanto o veículo que o leva desloca-se com velocidade normal. Entretanto, tal método demanda alto custo, além de mão de obra especializada.

Os equipamentos da classe 3 são chamados de tipo-resposta, pois não medem o perfil diretamente e recorrem ao uso de equações de correlação para estimar o IRI. Os equipamentos pertencentes a esta classe são: o MERLIN, *Roadmaster*, ROMDAS, *Roughmeter*, *TRL Bump Integrator*, *Rolling straight edge*, *Maysmeter* e outros.

Esses medidores tipo-resposta medem a irregularidade por meio do deslocamento do eixo de um veículo, dando o índice com base na soma acumulada dos deslocamentos verticais em relação a distância percorrida, em m/km. Esses dispositivos são relativamente baratos e podem ser utilizados facilmente, entretanto necessitam de calibração constante, pois dependem intimamente das características do veículo utilizado. De acordo com Bester (2003), a resposta dos veículos a irregularidade do pavimento depende da velocidade, das suas propriedades e do nível de irregularidade. Para Gillespie (1992), ações rotineiras como abastecimento, entrada de passageiros, pressão dos pneus, entre outros, mudam as características do veículo, necessitando assim de uma nova calibração do equipamento.

Finalmente, a classe 4 é aquela que engloba as avaliações subjetivas. De acordo com Douangphachanh e Oneyama (2014), existem situações que os dados de irregularidade não necessitam de grande precisão ou simplesmente não é possível obter

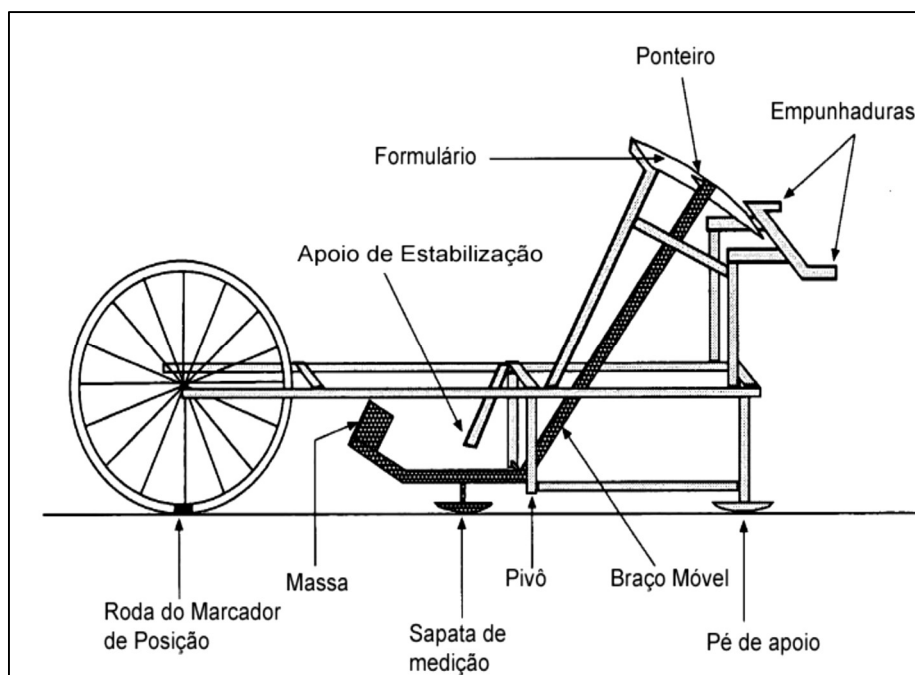
dados precisos. Nesses casos, pode-se recorrer a uma avaliação subjetiva, mediante experiência prévia do avaliador e uma inspeção visual.

Dessa forma, a escolha do equipamento mais adequado para medir a irregularidade depende da finalidade para utilização dos resultados, do tempo disponível e dos recursos financeiros, que é um fator limitante principalmente em países em desenvolvimento como o Brasil.

Sayers e Karamihas (1998) explicam que para o controle em nível de rede é suficiente determinar os níveis de irregularidade com base na segmentação da estrada em amostras. No entanto, para trabalhos de diagnóstico, mais específicos, é conveniente saber localizar exatamente onde um pavimento é irregular. Logo, alguns sistemas de medida são mais apropriados para um nível de rede e outros para o nível de projeto.

### 2.5.1 MERLIN

O MERLIN é um equipamento da classe 3, que foi desenvolvido pelo *Transportation Research Laboratory* (TRL) da Inglaterra, com o objetivo de ser um equipamento simples, barato e que pode ser facilmente construído, visando possibilitar a avaliação da irregularidade longitudinal. Em virtude dessas vantagens, o MERLIN foi o equipamento utilizado nessa pesquisa. O equipamento pode ser observado na figura 4.



**Figura 4** – Desenho esquemático do MERLIN (CUNDILL, 1996 adaptado por BARELLA 2008).

Parecido com uma bicicleta, este equipamento de uma roda é operado por uma pessoa que vai caminhando e registrando medidas em intervalos regulares. Recomenda-se que outra pessoa auxilie no registro das medidas em formulário adequado.

O MERLIN mede a distância vertical entre a sapata, que toca o chão, e uma linha imaginária que une os dois apoios externos. Tais medidas são marcadas em um histograma de frequência para uma posterior depuração estatística e aplicação da fórmula de correlação para obtenção do IRI.

Para que seja obtido o IRI, é necessário que sejam feitas 200 medidas sucessivas, segundo Cundill (1996). Sugere-se que essas medidas sejam espaçadas a cada dois metros ao longo da trilha de roda. Ao finalizar o levantamento, são descartados 10% dos valores extremos de cada lado do histograma, sendo 10 na parte superior e 10 na inferior. Após isso, é determinada a largura “D” do histograma, a qual é usada para o cálculo do IRI que é dado pela equação 4.

$$IRI = 0,593 + 0,0471.D$$

(2,4 < IRI < 15,9) (4)

De acordo com Barella (2008), técnicos de campo brasileiros que já verificaram os resultados de tal equipamento relatam que a exatidão dos resultados obtidos com o MERLIN é razoável, especialmente para valores mais altos de irregularidade, sendo que sua utilização está mais ligada a levantamentos de pequenos trechos por ser manual. Ainda, o equipamento é de fácil operação, com o qual alguém com o mínimo treinamento consegue trabalhar adequadamente.

Em estudo realizado por Heyn *et al.* (1989), foram comparados três métodos para determinação da irregularidade longitudinal, sendo eles: Nível e Mira amostrados em intervalos de 50 cm, IPR-USP e o MERLIN. Após correlações estatísticas, dos três métodos, o MERLIN obteve o melhor resultado, parecendo ser a alternativa “*low tech*” mais adequada para o monitoramento de pavimentos, devido às suas características de baixo custo, simplicidade e robustez.

Morrow *et al.* (2006) realizaram um estudo comparativo entre diversos equipamentos utilizados para calibração de sistemas de maior rendimento, sendo eles: o z-250, o *Walking Profilometer*, o MERLIN, o Riley e o Nível e Mira. Após a comparação, notou-se que os inclinômetros estacionários são relativamente caros e trabalhosos, além de serem altamente sensíveis à maneira de como são operados. O *Walking Profilometer* é

mais rápido e fácil de operar, porém mais caro. O MERLIN obteve ótimo desempenho e é fácil de utilizar. O método de Nível e Mira, por sua vez, é uma técnica cara e trabalhosa. Dessa forma, concluíram que cada equipamento apresenta certas vantagens sobre seus concorrentes e a escolha entre essas ferramentas depende do critério de quem vai avaliar.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos utilizados na realização da pesquisa e que possibilitaram o atingimento dos objetivos. Primeiramente abordam-se os materiais, como: o equipamento MERLIN utilizado no levantamento da irregularidade longitudinal; as bicicletas, o *smartphone*, o suporte e os aplicativos utilizados para coletar dados de vibração no ciclismo; o formulário elaborado para a avaliação subjetiva; e o *software* utilizado para a análise estatística. Posteriormente, são descritas, em etapas, as atividades seguidas no método.

#### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa foram: o equipamento MERLIN, duas bicicletas, um *smartphone*, um suporte para fixar o aparelho nas bicicletas, dois aplicativos que retornam valores de aceleração vertical, um formulário elaborado para a avaliação subjetiva dos ciclistas e um *software* estatístico.

O MERLIN foi utilizado nesta pesquisa para o levantamento da irregularidade longitudinal dos pavimentos nos trechos selecionados na infraestrutura cicloviária da cidade de João Pessoa-PB. A figura 5 ilustra o equipamento utilizado.



**Figura 5** – Equipamento MERLIN utilizado na pesquisa.

As bicicletas utilizadas como transporte para a coleta dos dados de vibração foram escolhidas de acordo com suas características de peso, suspensão e material, sendo uma

mais rígida e uma menos rígida, com o intuito de verificar se estas influenciam na vibração no ciclismo. É importante deixar claro que as bicicletas, apresentadas na figura 6, estavam em boas condições e com os pneus calibrados, que são pré-requisitos para as medições. As características que diferenciam as bicicletas podem ser vistas na tabela 3.



**Figura 6** – Bicicletas utilizadas na pesquisa.

**Tabela 3** – Características das bicicletas utilizadas na pesquisa.

<b>Características</b>	<b>Bike 1</b>	<b>Bike 2</b>
Material do quadro	Aço carbono	Aço
Quadro	19	19
Aro do pneu	29"	29"
Pressão do pneu (Psi)	32	30
Sistema de suspensão	Existente	Não existente
Peso (kg)	20	25

Como pode ser observado na tabela 3, as bicicletas foram denominadas “Bike 1” e “Bike 2”, sendo classificadas em menos rígida e mais rígida, respectivamente, de acordo com suas características. A bicicleta menos rígida, “Bike 1”, tem um quadro de aço carbono, um material leve em oposição ao aço; possui um sistema de suspensão, que possibilita um maior amortecimento ao trafegar; e é mais leve que a outra, pesando 20 kg.

O *smartphone* utilizado na pesquisa foi da marca Xiaomi, modelo Mi 9 SE, o qual foi escolhido por ser um modelo de última geração no momento da pesquisa. Para fixá-lo nas bicicletas foi necessário um suporte, que deveria manter o aparelho estático, sem sofrer movimentações, para que os dados coletados representassem fielmente a vibração sofrida pelo ciclista ao trafegar. Vale salientar que foram testados dois suportes antes do início da coleta, sendo escolhido o que está na figura 7 por conseguir manter o *smartphone* estático, sem sofrer “flutuações” durante as medições.



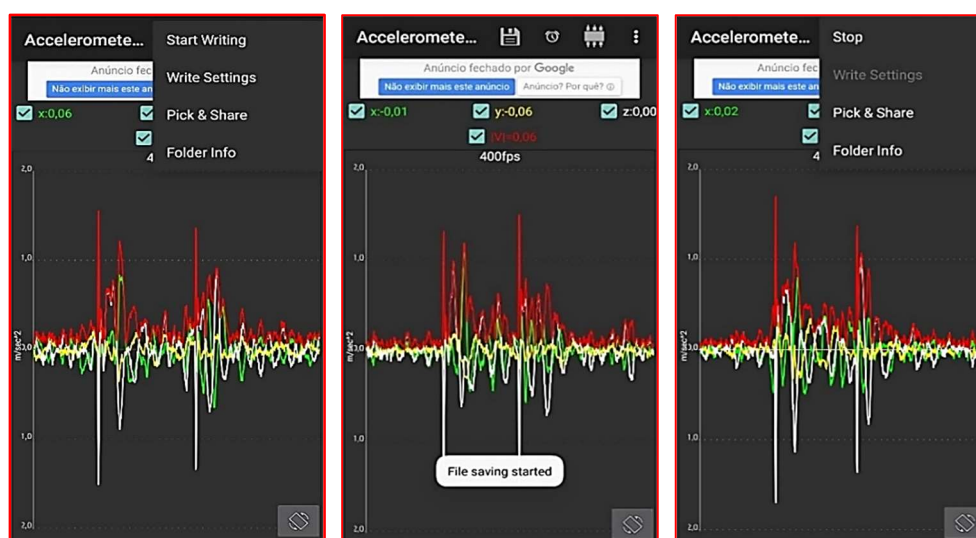


**Figura 7** – Suporte utilizado para fixar o *smartphone* nas bicicletas.

Como pode ser visto na figura 7, o suporte é composto por duas partes. A primeira é a base, que é rosqueada junto ao guidão da bicicleta. A segunda parte é encaixada na primeira e recebe o *smartphone*, acomodando-o durante as medições com suas quatro garras.

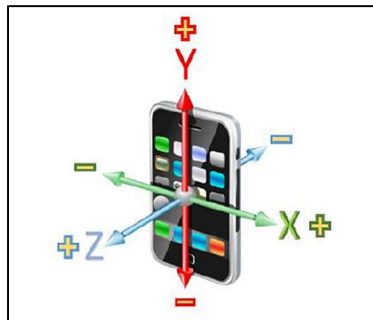
Para obter a aceleração vertical durante o ciclismo com uso de um *smartphone*, foi preciso a instalação de um aplicativo com esta função. Após pesquisas na literatura, escolheu-se dois aplicativos, objetivando a comparação dos dados colhidos por eles. Os aplicativos utilizados foram o *Accelerometer Analyzer* e o *AndroSensor*, todos na versão *Android* e disponíveis gratuitamente na plataforma *Google Play Store*.

O *Accelerometer Analyzer* tem opções para várias taxas de aquisições de dados, sendo que a *Fastest* foi a escolhida nesta pesquisa, por ser a mais rápida, a qual depende da capacidade do *smartphone*, cujo aplicativo vai coletar dados com a frequência máxima do aparelho. O aplicativo retorna valores de aceleração nos eixos “x”, “y” e “z”, tendo também a opção de retornar o valor de RMS. Na figura 8 pode-se observar a página inicial e um exemplo de medição com o aplicativo.



**Figura 8** – Exemplo de medição com *Accelerometer analyzer*.

Como é possível notar na figura 8, o aplicativo em destaque retorna valores de aceleração nos eixos “x”, “y” e “z”, além do valor de RMS. Para começar a medição é necessário dar um comando na tela do *smartphone*, como também para pará-la, sendo “Start Writing” e “Stop”, respectivamente. Ao final, é obtido um arquivo no formato .txt, o qual fica gravado no cartão de memória. Para facilitar a visualização das coordenadas de um *smartphone*, pode-se observar a figura 9. O eixo “z” está direcionado para o exterior frontal da tela do aparelho, o eixo “x” está na horizontal e aponta para a direita e o eixo “y” está na vertical, apontando para cima.



**Figura 9** – Sistema de coordenadas de um *smartphone* (BISCONSINI, 2016).



Já o *AndroSensor*, além de retornar valores de aceleração, ainda tem vários outros sensores, como: GPS, giroscópio, campo magnético, temperatura, etc. Portanto, os sensores que não interessavam à pesquisa foram desativados, pois poderiam interferir nas medições e consumir mais carga do aparelho. Vale salientar, que este aplicativo possui uma taxa de aquisição máxima de 100 Hz (100 medidas por segundo), a qual foi utilizada nesta pesquisa. A figura 10 apresenta a página inicial e um exemplo de medição do aplicativo mencionado.



**Figura 10** – Exemplo de medição com o *AndroSensor*.

Este aplicativo também retorna valores de aceleração nos três eixos, tendo a opção de descontar ou não a aceleração da gravidade. Para iniciar e finalizar a medição é necessário um comando na tela do *smartphone*, mais especificamente no botão vermelho, como pode ser visto na figura 10. Ao término do levantamento, obtém-se um arquivo .csv que fica gravado no cartão de memória.


Para realização da avaliação subjetiva pelos ciclistas, foi elaborado um questionário composto por duas partes, sendo: a primeira contendo requisitos que devem ser seguidos na realização da avaliação (figura 11) e a segunda com duas perguntas, uma tratando sobre a sensação de conforto que eles tiveram ao percorrer os trechos, considerando a superfície do pavimento e a intensidade das vibrações, e a outra sobre a aceitabilidade ou não do trecho (figura 12).




**CONDIÇÕES PARA A AVALIAÇÃO SUBJETIVA DA INFRAESTRUTURA CICLOVIÁRIA**

- O avaliador deve considerar somente o estado atual da superfície, o qual influencia no conforto do ciclista, consequentemente, pode classificar o trecho como “bom/ confortável”, embora suspeite que a situação poderá mudar futuramente.
- A avaliação não deve ser feita sob condições climáticas desfavoráveis.
- O avaliador deve ignorar outros aspectos que podem influenciar no conforto, como: segurança viária, volume de tráfego, sinalização, condições ambientais, geometria do trecho, etc.
- O avaliador deve considerar as vibrações resultantes da irregularidade do pavimento que afetam o conforto.
- Na avaliação de uma série de trechos cicloviários, o avaliador não deve levar em conta os valores assinalados para os trechos anteriormente avaliados, devendo cada trecho ser avaliado independentemente.
- Os avaliadores não devem comentar a sua avaliação com os outros avaliadores, pois ela é individual.
- A ficha de avaliação deve ser preenchida de acordo com a percepção individual do ciclista, variando de uma escala de 0 (péssimo/extremamente desconfortável) a 5 (ótimo/extremamente confortável), com até duas casas decimais.
- O avaliador deve imaginar qual o conforto que o trecho lhe proporciona se tivesse que trafegar por 5 km sobre aquela superfície.
- Cada trecho deve ser percorrido na mesma trilha de roda e com a velocidade usual do ciclista.
- Conforto é definido como o estado de bem estar sob condições ótimas.

**Figura 11** – Orientações para a avaliação subjetiva.




**UFPA**



**PPGECAM**  
Programa de Pós-graduação  
Em Engenharia Civil e Ambiental  
UFPA Universidade Federal do Pará

## FORMULÁRIO PARA AVALIAÇÃO SUBJETIVA DA INFRAESTRUTURA CICLOVIÁRIA



Infraestrutura cicloviária/trecho: \_\_\_\_\_ Data: \_\_/\_\_/\_\_

Nome do avaliador: \_\_\_\_\_

1. Qual sensação de conforto você teve ao percorrer o trecho considerando as condições de superfície do pavimento e a intensidade das vibrações?

	<b>5</b>		<b>Conceito</b>
_____		<b>ÓTIMO</b>	
_____		Extremamente confortável	
_____	<b>4</b>		
_____		<b>BOM</b>	
_____		Confortável	
_____	<b>3</b>		
_____		<b>REGULAR</b>	
_____		Pouco desconfortável	
_____	<b>2</b>		
_____		<b>RUIM</b>	
_____		Inconfortável	
_____	<b>1</b>		
_____		<b>PÉSSIMO</b>	
_____		Extremamente Inconfortável	
_____	<b>0</b>		

**Figura 1 – Ficha de avaliação (escala de notas e conceitos para a avaliação subjetiva).**

2. Você considera o trecho aceitável?

Sim ( )                      Não ( )

**Figura 12 – Perguntas para a avaliação subjetiva.**

Finalmente, para realização das análises estatísticas, foi usado o *software* R, o qual é de acesso livre e é aceito por uma ampla variedade de sistemas operacionais. Este é adequado para manipulação de dados, cálculos e exibição gráfica, no qual o usuário pode programar ou utilizar uma extensa coleção de pacotes já disponíveis na internet.

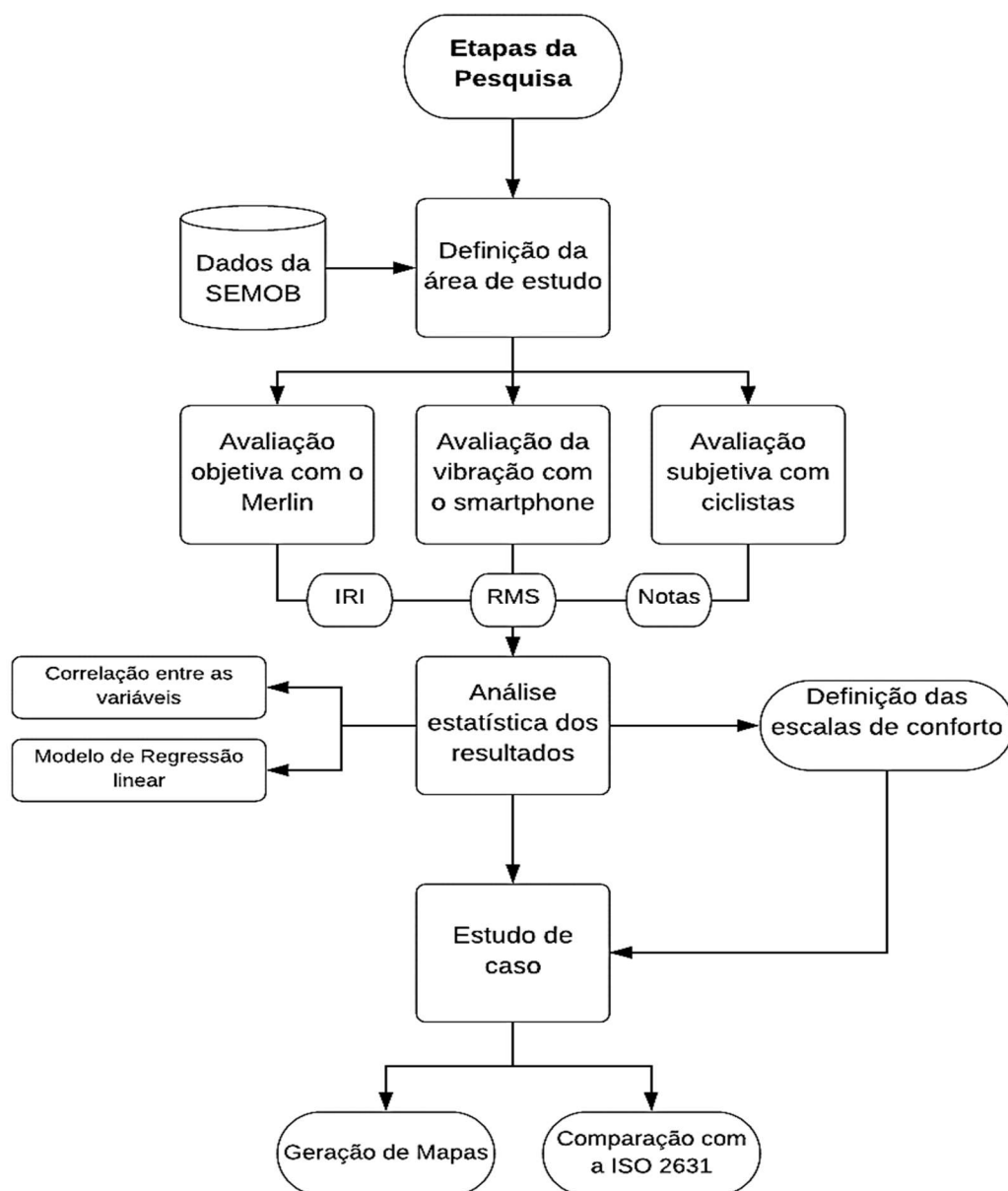
### 3.2 Métodos

A pesquisa foi dividida em seis etapas, cada uma com suas atividades individuais, foram elas:

1. Definição da área de estudo dentro da infraestrutura cicloviária da cidade de João Pessoa-PB;

2. Avaliação objetiva com o equipamento MERLIN;
3. Avaliação objetiva da vibração no ciclismo com o auxílio de *smartphone*;
4. Avaliação subjetiva com os ciclistas;
5. Análises estatísticas dos dados;
6. Estudo de Caso com a aplicação dos resultados obtidos na pesquisa.

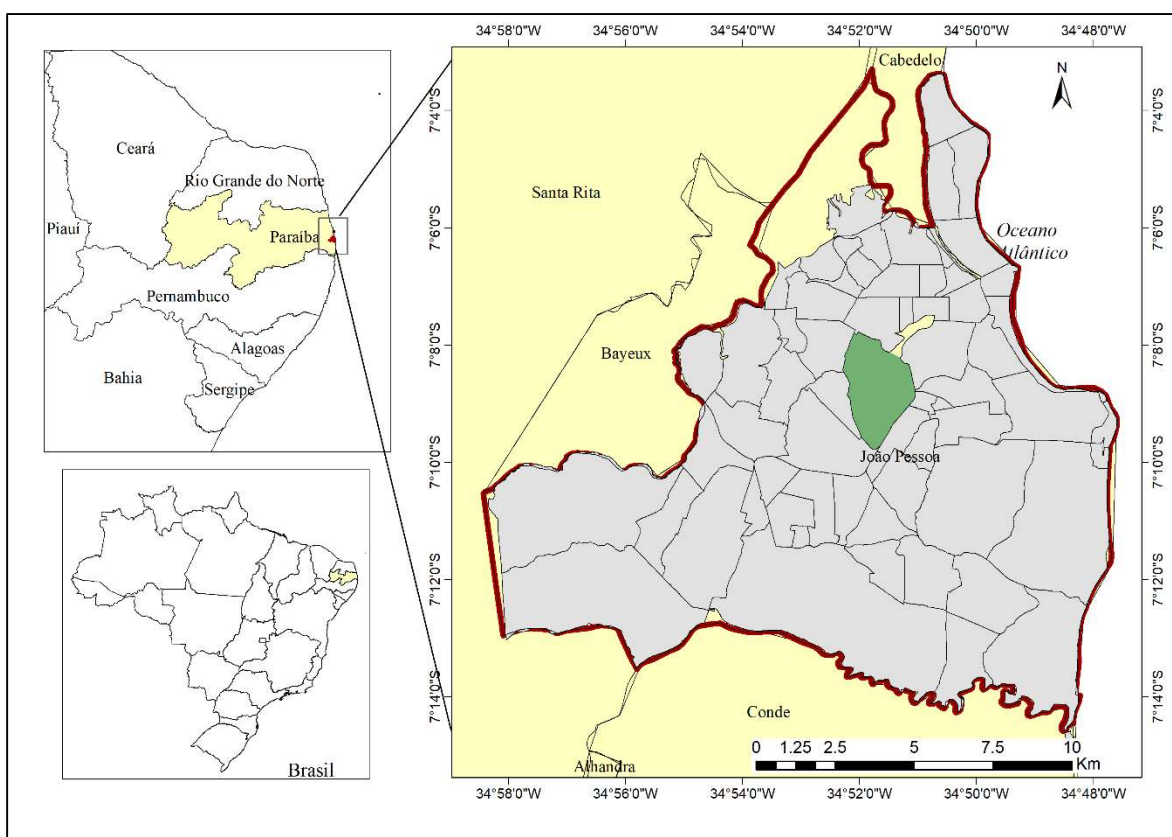
O fluxograma da figura 13 exemplifica o método do trabalho.



**Figura 13** – Fluxograma do método.

### 3.2.1 Definição da área de estudo

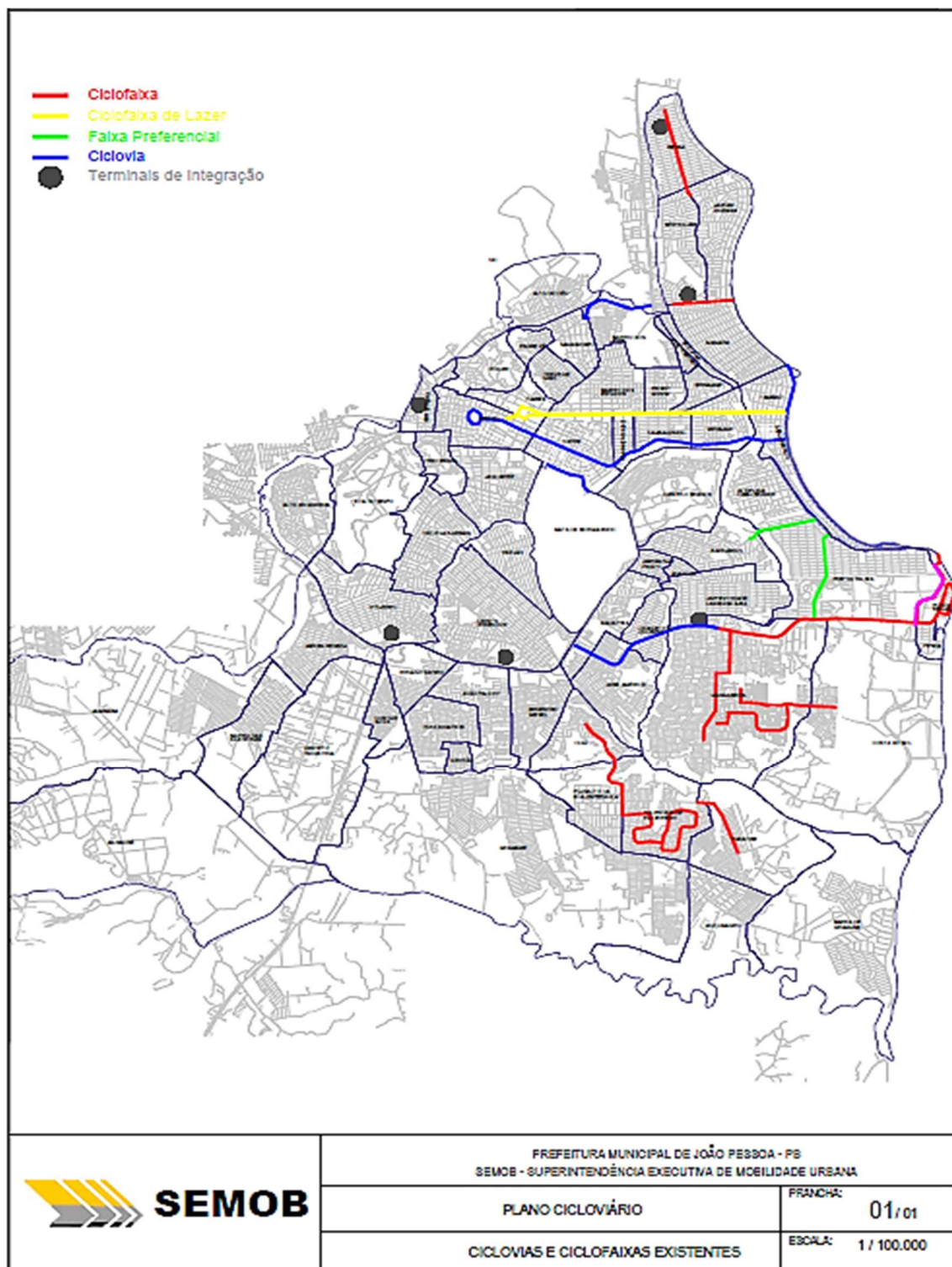
Inicialmente, foi definida uma área de estudo dentro de um universo representado pela malha cicloviária da cidade de João Pessoa-PB. A capital da Paraíba possui uma área territorial de 211,286 km<sup>2</sup>, tem uma população estimada em 809.015 pessoas e uma densidade demográfica de 3.421,28 hab/km<sup>2</sup>, sendo a 24ª cidade mais populosa do Brasil, segundo dados do IBGE (2018). Na Figura 14 pode-se observar o mapa territorial de João Pessoa.



**Figura 14** – Mapa territorial e localização geográfica de João Pessoa.

A cidade de João Pessoa dispõe de uma infraestrutura cicloviária de 72 km, sendo dividida em ciclovia, ciclofaixa, ciclofaixa de lazer e faixa preferencial. Destas, 22 km são ciclovias e 27 km são ciclofaixas implantadas principalmente a partir de 2009 em 17 bairros. Para a escolha da área de estudo utilizaram-se os seguintes critérios: diferentes bairros, tipos e condições do pavimento, e planicidade do terreno. A malha cicloviária de João Pessoa está ilustrada na figura 15, fornecida pela Superintendência Executiva de Mobilidade Urbana (SEMOB), a qual mostra as ciclovias e ciclofaixas já existentes na cidade, e como estão distribuídas espacialmente.





**Figura 15** - Plano ciclovitário de João Pessoa-PB (SEMOB, 2019).

A tabela 4 apresenta a malha ciclovitária de João Pessoa, mostrando a sua extensão, localização e o ano de implantação.

**Tabela 4 - Infraestrutura cicloviária de João Pessoa (SEMOB, 2019).**

Bairro	Rua	Ciclovias (km)	Ciclofaixa (km)	Faixa preferencial (km)	Ciclofaixa de treinamento	Ciclofaixa de lazer	Ano de implantação
Centro	Parque da Lagoa	0.892					2016
Centro	Av. Epitácio Pessoa					11.600	2013
Geisel e Cuiá	Adaleisa Carneiro Cavalcante		2.458				2010
Valentina	Mariangela L. Peixoto		1.948				2011
	Inspetora Emilia Mendonça/Avelina dos Santos		2.726				
Paratibe	Nova Mangabeira		1.529				2011
Mangabeira	Coronel Benevenuto Gonçalves da Costa/Severino Macena Dantas/Prefeito Luis Alberto Moreira Coutinho		2.749				2011
Mangabeira/Cidade verde	Tenente Antônio Lima Pessoa		4.677				2011
José Américo/Mangabeira	Av. Hilton Souto Maior (viaduto de Mangabeira)	3.276					2009
	Av. Hilton Souto Maior (PB - 008)		4.068				
Costa do Sol	Av. Panorâmica (Farol do Cabo Branco)		1.820				2012
	Av. Panorâmica (Estação Ciências)				3.340		
Cabo Branco	Orla de Cabo Branco e Tambaú	5.230					2010
Altiplano	Av. João Cyrilo	3.709					SEINFRA
Quadramares	Av. Antônio Mariz			3.946			2012
Timbó	Av. João Crisóstomos			2.887			2012
Manaira	Av. Flávio Ribeiro Coutinho		1.207				2000
Bessa	Av. Paulo Roberto accioly		1.972				2013
Torre	Av. Pedro II	1.120					2009
Ipês	Tancredo Neves - Revitalizar	1.663					Dec. de 80
Torre/Expedicionários/Tambauzinho/Miramar/Cabo Branco	Avenida Ministro José Américo de Almeida	6.465					2018
Ponta do Seixas	Com. José Gomes dos Santos/Maceio/Pescadores/Falésias		2.175				2017
KM	<b>Total de ciclovias existentes</b>	22.355	27.329	6.833	3.340	11.600	
	<b>Total da malha cicloviária</b>	59.857				11.600	
	<b>Total geral</b>	71.457					

Portanto, ao analisar os dados fornecidos pela SEMOB e realizar uma visita *in loco*, foram selecionados trechos de ciclovias e ciclofaixas, pois dispõem de diferentes tipos de pavimentos, sendo respectivamente, pavimento de concreto e pavimento flexível, o que é importante para identificar se o tipo de pavimento influencia no conforto do ciclismo. Além disso, os trechos escolhidos apresentam diferentes condições visuais (boa, regular e



ruim), estimadas pela quantidade de defeitos, estão distribuídos em diferentes bairros e são planos, pois é relevante analisar todos os cenários que os ciclistas são expostos.

### 3.2.2 *Levantamento da irregularidade longitudinal com o MERLIN*

Para realização do levantamento da irregularidade longitudinal, optou-se pelo MERLIN, equipamento que é barato, simples e uma alternativa para locais com poucos recursos. Seguiu-se o procedimento descrito pelo *TRL report 229* (1996), que estabelece 200 medidas sucessivas e de igual espaçamento para o cálculo do IRI.

O espaçamento mais indicado, mas não fixo, é de 2 m, resultante de uma volta completa da roda do equipamento. Entretanto, foi necessário adaptar o método tradicional, buscando um espaçamento referente a um comprimento de onda que seja significativo para causar desconforto aos ciclistas, já que o MERLIN foi projetado para rodovias, cuja velocidade dos veículos é estipulada em 80 km/h. Logo, como trata-se de infraestruturas cicloviárias, cujas bicicletas atingem uma velocidade média de 20 km/h, espera-se que o comprimento de onda que estimule vibrações naturais sobre os ciclistas seja menor.

De acordo com Sayers *et al.* (1986) e Gillespie (2001) a escala de IRI é sensível às ondas de superfícies na roda do veículo com frequência de aproximadamente 10 Hz a 80 km/h, logo a vibração natural da roda seria estimulada por ondas de superfície de cerca de 2,2 m. Isso significa que ocorre um distúrbio periódico a cada 2,2 m na rodovia. Portanto, segundo Cundill (1991), nota-se que os espaçamentos sugeridos para as medidas com o MERLIN foram selecionados de modo que o comprimento de onda da frequência fundamental esteja próximo do comprimento das ondas da superfície, o que estimula a vibração natural da roda.

Dessa maneira, considerando a velocidade média da bicicleta de 20 km/h e mantendo a frequência fundamental das ondas da superfície de 10 HZ, basta aplicar a equação fundamental das ondas para obter um comprimento de onda de 0,5 m; o qual foi usado como espaçamento entre as 200 medidas sucessivas com o MERLIN. Logo, para o levantamento da irregularidade longitudinal, o comprimento dos trechos foi de 100 m.

O equipamento foi alinhado, calibrado e testado em uma seção teste conforme o procedimento. O alinhamento deve ser feito com o equipamento de cabeça para baixo, verificando os alinhamentos laterais entre o apoio traseiro, a sapata de medição e a roda dianteira. Se os elementos não estiverem alinhados, é possível mexer a sapata, que possui um sistema de rosca triangular com duas porcas, possibilitando assim o alinhamento do

MERLIN e simulando uma superfície plana ideal, que se concretiza quando o ponteiro de leitura está na marcação central do quadro de medição. A figura 16 ilustra a etapa de alinhamento do equipamento.



**Figura 16** – Alinhamento do MERLIN.

A calibração do equipamento é realizada com o aparelho apoiado, onde a sapata de medição está em contato com a superfície de aferição, anotando-se assim o valor da medição na escala indicada pelo ponteiro. Posteriormente, a sapata de medição é levantada e um bloco de metal, de espessura conhecida, medindo cerca de 50 mm de comprimento, 25 mm de largura e 6 mm de espessura, é colocado sob a sonda, fazendo-se assim uma nova leitura do ponteiro na escala de medição. O procedimento deve ser repetido para certificar se os valores são consistentes. A figura 17 apresenta a calibração do MERLIN.



**Figura 17** - Calibração do MERLIN: a) Equipamento apoiado; b) Equipamento e bloco de metal; c) Bloco de metal sob a sonda.

Após as leituras feitas durante a calibração, é aplicada a equação 5, necessária para o ajuste do valor de “D” (largura do histograma).

$$\text{Fator de correção} = \frac{10T}{S} \quad (5)$$

Em que:

*T: Espessura do bloco de calibração (mm);*

*S: Espaçamento entre as duas leituras de calibração.*

Todas as leituras de “D” devem ser multiplicadas pelo fator de calibração da máquina, de modo a corresponder a uma maior realidade das medições feitas. Vale salientar que quando o equipamento estiver perfeitamente calibrado, o espaço entre as duas leituras deve ser exatamente 10 vezes maior que a espessura do bloco utilizado na calibração. A partir da calibração, obteve-se um fator de calibração de 0,9353, o qual é utilizado para cálculo da irregularidade longitudinal.

Após o alinhamento e calibração, escolheu-se uma seção teste para verificar o funcionamento do equipamento, a qual foi a via de acesso, de pavimento flexível, entre o Centro de Ciências Jurídicas (CCJ) e o Centro de Ciências Exatas e da Natureza (CCEN) no Campus I da UFPB, como pode ser visto na figura 18.

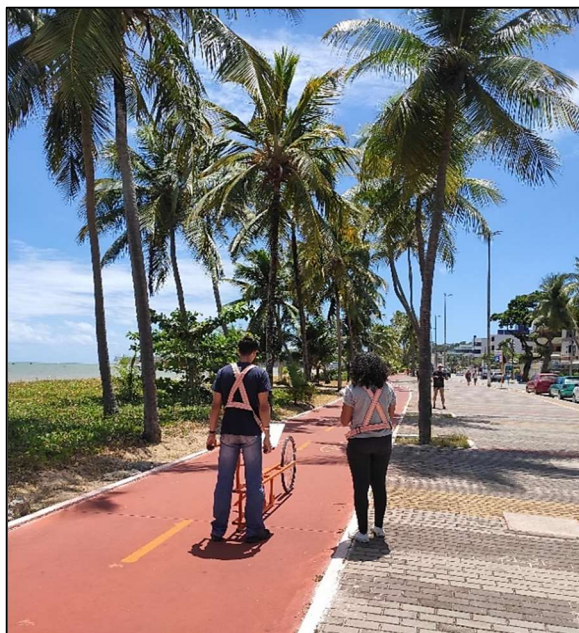


**Figura 18** – Teste do equipamento.

A via em destaque possui um pavimento em boas condições e que recebe pouco tráfego, então deveria retornar valores baixos de IRI. Ao fim do teste, verificou-se que os

resultados obtidos foram coerentes com a situação atual do estado de conservação do pavimento. Desse modo, concluiu-se que as etapas preliminares para se fazer uso do MERLIN foram bem sucedidas, sendo possível assim começar os levantamentos na malha cicloviária.

Durante o levantamento de dados na infraestrutura cicloviária, o equipamento era transportado para os trechos em veículos do modelo picape, tomando todos os cuidados com a sua segurança. Ao chegar nos locais de medição, o MERLIN era manipulado por dois operadores treinados que se revezavam na operação do equipamento e no preenchimento dos formulários com as 200 leituras realizadas (figura 19). Finalmente, o IRI era calculado utilizando a equação 4.



**Figura 19** – Levantamento com o MERLIN.

### **3.2.3** *Medidas de vibração com Smartphones*

Nesta etapa utilizou-se um sistema de medição composto por: um *smartphone*, dois aplicativos pré-instalados que retornam valores de aceleração vertical, um suporte para fixar o aparelho no guidão das duas bicicletas e um ciclista experiente para conduzi-las. O sistema de medição pode ser visto na figura 20.





**Figura 20** – Sistema de medição da vibração.

Na figura 20 é possível notar as duas bicicletas com o *smartphone* fixado no guidão. Pode-se observar também a tela inicial dos dois aplicativos antes da medição, os quais eram colocados em uso um de cada vez, pois precisam estarem abertos para gravar os dados de aceleração. É válido dizer que o *smartphone* devia ser bem fixado no guidão da bicicleta, de modo que não sofresse flutuações, portanto dois suportes foram testados (pré-levantamento) e aquele que teve o melhor resultado foi escolhido.

A realização das medidas de vibração foi feita por meio de acelerômetros presentes nos *smartphones*, os quais possibilitam medir a aceleração vertical, sofrida pelo ciclista, proveniente dos desvios no pavimento. Logo, a primeira atividade foi instalar, no aparelho, os aplicativos *Accelerometer Analyzer* e *AndroSensor*, que retornam valores de aceleração.

Posteriormente, partiu-se para campo para realizar as medições. Antes do início das medições, o *smartphone* era nivelado e era verificada a sua frequência de atualização dos dados. Isso foi possível com a realização de medições com a bicicleta estática, onde o *smartphone* estava nivelado horizontalmente se os valores de aceleração estivessem próximos de zero, já que não estão sofrendo nenhuma influência.

Após o nivelamento, com o sistema de medição montado em cada bicicleta, uma mais rígida e outra menos rígida, o ciclista foi instruído a trafegar com uma velocidade entre 15 e 20 km/h durante os trechos de 100 m. Foram realizadas oito medições em cada trecho, sendo quatro medições para cada bicicleta, com duas para cada aplicativo. Optou-se

por duas medidas com cada aplicativo, visando diminuir o erro aleatório. A tabela 5 apresenta as características do ciclista que participou desta etapa.

**Tabela 5 – Características do ciclista.**

<b>Características</b>	<b>Ciclista</b>
Gênero	Masculino
Idade	28
Altura (cm)	190
Peso (kg)	76
Anos de experiência	6
Km rodados na vida	Mais de 2000

Não existe uma definição clara do que seria um ciclista experiente, entretanto o ciclista em destaque foi considerado experiente devido aos seus seis anos utilizando a bicicleta e os seus mais de 2000 km rodados.

Vale salientar que o ciclista foi transportado, junto com as bicicletas, até os trechos para que não houvesse interferência na sua condição física, já que ele deveria manter a velocidade estipulada em todas as medições. Ao término dessas medições, os dados coletados de aceleração ficaram gravados no cartão de memória e foram enviados por *e-mail* para as devidas análises em computador.

Todos os arquivos foram exportados para planilhas eletrônicas, onde receberam um processamento para posterior cálculo do RMS, utilizando a equação 2 descrita no referencial. O RMS está relacionado com a vibração sofrida no ciclismo e a irregularidade do pavimento, onde altos valores estão ligados a passeios menos confortáveis. É importante dizer que se houvesse uma anomalia significativa nos dados, as medições deveriam ser realizadas novamente.

Com os valores de aceleração vertical em planilhas eletrônicas, decidiu-se suprimir os dados do 1,5 segundo inicial e final, já que o ciclista deveria dar o comando na tela do *smartphone* para iniciar a gravação, como também para finalizá-la. Outro ponto importante, foi a utilização da aceleração apenas no eixo “z”, já que em outras pesquisas foi comprovado que esta é a que mais influi na vibração quando o *smartphone* está na horizontal.

Depois da retirada dos dados iniciais e finais da aceleração no eixo “z”, foi aplicado um filtro de média móvel, muito utilizado em processamento de sinais. Este tem o objetivo de atenuar os picos de frequência, reduzir os erros aleatórios e remover os ruídos das

medições. O filtro de média móvel foi aplicado de acordo com a equação 3, com um intervalo de 20 janelas, ou seja, uma média foi calculada a cada 20 dados de aceleração.

Finalmente, o RMS foi calculado com a equação 2 para cada passagem do ciclista. Sendo que a vibração do trecho é dada pela média entre os RMS's das duas medições com cada aplicativo e cada bicicleta.

#### **3.2.4 Avaliação subjetiva com os ciclistas**

Após as avaliações objetivas de irregularidade longitudinal e de vibração, foi realizada uma avaliação subjetiva nos trechos, visando obter a percepção de conforto dos ciclistas. Tomou-se o cuidado para que as avaliações fossem feitas o mais rápido possível, a fim de que os segmentos avaliados estivessem com as mesmas características. Essas avaliações foram realizadas por cinco ciclistas, os quais percorreram os trechos em suas bicicletas, na sua velocidade normal, e responderam às perguntas do formulário apresentado na figura 12.

A primeira pergunta a ser respondida trata da percepção de conforto do ciclista, de acordo com as condições do pavimento e as vibrações sofridas durante o percurso. O ciclista poderia dar notas de 0 a 5, em uma escala que varia de “Extremamente desconfortável” para “Extremamente confortável”, respectivamente. A segunda pergunta era se o ciclista considerava o trecho aceitável ou não. Esse formulário foi respondido imediatamente após o ciclista percorrer o trecho avaliado.

Contudo, para realização dessa avaliação foram dadas algumas orientações aos ciclistas, as quais podem ser vistas na figura 11, como:

- O avaliador deve considerar somente o estado atual da superfície, mesmo que ela venha a se deteriorar em um futuro próximo;
- O avaliador deve considerar apenas as irregularidades do pavimento e as vibrações no ciclismo;
- O avaliador não deve se comunicar durante a avaliação, para que sua resposta não tenha interferência de outro companheiro;
- O avaliador deve imaginar qual seria o conforto proporcionado por aquele trecho ao percorrê-lo por 5 km, que é uma distância recomendada para viagens urbanas confortáveis de bicicleta.

Ao fim desta etapa de campo, os formulários com as respostas dos ciclistas foram passados para planilhas eletrônicas. Foi verificado a confiabilidade das respostas por meio do índice de *Cronbach*, utilizando a equação 1, onde valores de Alfa acima de 0,7 indicam que os resultados são confiáveis.

Os resultados desta etapa serviram para comparar com os das avaliações objetivas, possibilitando o estabelecimento de uma escala de conforto com base na vibração e na irregularidade longitudinal dos pavimentos.

### 3.2.5 Tratamento estatístico e análise dos dados

Com os dados coletados, partiu-se para as análises estatísticas entre os resultados obtidos com as avaliações objetivas e subjetivas, utilizando o *software* R. As análises realizadas foram:

- Correlação entre os valores de irregularidade longitudinal, vibração e a avaliação subjetiva, obtendo os coeficientes  $R^2$  e  $R^2$  ajustado. Esses coeficientes indicam o quão ajustado é um dado modelo que envolve variáveis dependentes e independentes, sendo que valores mais próximos de 1 significam um modelo melhor ajustado;
- Gráficos de dispersão para verificar visualmente a associação entre as variáveis;
- Regressão linear entre as variáveis, obtendo a equação de previsibilidade do modelo, cuja variável independente pode retornar os valores da dependente;
- Verificação do modelo de regressão para checar a sua validade, já que não bastam apenas os coeficientes  $R^2$ , que são utilizados para uma estimação “geral” do modelo. O modelo foi verificado pelo método da normalidade, que verifica se os erros são normalmente distribuídos, e pelo gráfico de resíduos *versus* valores ajustados, que detecta inadequações no modelo, como a presença de *outliers*, a heterocedasticidade, etc. A técnica gráfica da normalidade plota os resíduos escalonados em ordem crescente, *versus* os *quantis* da distribuição normal padrão, cuja indicará normalidade quando os pontos estiverem aproximadamente em linha reta de 45 °. Já o gráfico dos resíduos *versus* valores ajustados indica que não há indícios de problemas



no modelo se os resíduos estiverem contidos de forma aleatória em uma faixa horizontal.

- Gráfico *Box-Plot*, tabela de frequências por classes e predição de valores de acordo com o modelo de Regressão Linear gerado, possibilitando assim a definição de escalas de conforto com base nos valores de IRI e RMS.

### 3.2.6 Mapas de Conforto e comparação com a ISO 2631-1 (1997)

Após o estabelecimento das escalas de conforto com base em IRI e RMS, foi realizado um Estudo de Caso na ciclovia do Bairro José Américo em João Pessoa-PB, visando verificar a aplicação dos resultados obtidos.

Primeiramente, o ciclista, que participou da avaliação objetiva, percorreu uma seção de 700 m com a bicicleta mais rígida e utilizando o aplicativo *Accelerometer Analyzer*. Os dados obtidos com essa medição passaram pelo mesmo processamento descrito anteriormente e calculou-se o RMS, sendo que a seção foi dividida em sete trechos de 100 m.

Posteriormente, foi realizado o levantamento da irregularidade longitudinal com o equipamento MERLIN. Seguiu-se o mesmo procedimento descrito anteriormente para este tipo de avaliação, obtendo ao final valores de IRI correspondentes aos sete trechos de 100 m.

A seção analisada foi classificada de acordo com a escala de conforto definida nesta pesquisa, tanto para o IRI, quanto para o RMS. Para facilitar a visualização das condições de conforto, foram gerados mapas de conforto com o auxílio do *software Google Earth Pro*, os quais podem ajudar os planejadores de transportes na tomada de decisão quanto as intervenções necessárias. Além disso, o mapa relacionado ao RMS, que trata sobre a vibração no ciclismo, foi comparado com um mapa gerado de acordo com escala presente na norma ISO 2631-1 (1997), com vistas a identificar se existe alguma relação entre os dois.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos com a realização desta pesquisa e as discussões pertinentes.

### 4.1 Área de estudo

A área de estudo desta pesquisa foi definida ao analisar a malha ciclovitária da cidade de João Pessoa-PB e realizar uma visita *in loco*. Logo, de acordo com os seguintes critérios: tipos e condições dos pavimentos, bairros diferentes e planicidade do terreno, foram selecionados 10 trechos de ciclovias e 10 de ciclofaixas com 100 m de comprimento cada.

Estes trechos englobam pavimentos de concreto nas ciclovias, pavimentos flexíveis nas ciclofaixas, diferentes condições (boa, regular, ruim) e todos são planos. Na figura 21 são apresentados os 20 trechos que fizeram parte da área de estudo desta pesquisa. Os trechos selecionados localizam-se nos bairros: Valentina, José Américo, Mangabeira, Cabo Branco, Altiplano, Ponta do Seixas e Torre.



Figura 21 – Área de Estudo.

Os trechos do Bairro Valentina são identificados como V1, V2, V3, V4 e V5, os quais foram implantados no ano de 2011. Estes são ciclofaixas com pavimento flexível, cujos V1, V2, V4 e V5 localizam-se em áreas comerciais movimentadas, como pode ser visto na figura 22. Durante os levantamentos foram vistos muitos automóveis usando estas áreas exclusivas dos ciclistas, o que acelera a deterioração da infraestrutura e põe em risco a segurança do usuário.



**Figura 22 - Trecho V1.**

No Bairro José Américo são dispostos três trechos, identificados como J1, J2, J3. Estes fazem parte de uma ciclovia, com pavimento de concreto, que foi implantada no ano de 2009. Apesar de ter mais de 10 anos, nunca foi realizada manutenção no pavimento dos trechos, o qual apresenta muitos defeitos. A figura 23 apresenta o trecho J3.





**Figura 23 - Trecho J3.**

Os trechos H1 e H2 localizam-se no Bairro Mangabeira, mais precisamente na Avenida Hilton Souto Maior. Estes são ciclofaixas que tiveram implantação no ano de 2009, entretanto passaram por restauração devido uma valorização da área com a chegada de condomínios de luxo, como observado na figura 24.



**Figura 24 - Trecho H2.**

Os trechos do Bairro Ponta do Seixas são identificados como P1, P2 e P3. Estes localizam-se em uma faixa litorânea da cidade e foram implantadas no ano de 2017, apresentando boas condições visuais, o que pode ser visto na figura 25. Durante os levantamentos foi verificado que quem mais utiliza a infraestrutura são os próprios moradores locais para a prática de exercícios.



**Figura 25 - Trecho P3.**

No Bairro Altiplano localizam-se os trechos A1 e A2, que fazem parte de uma ciclovia com pavimento de concreto, a qual não se obteve informações sobre o ano de implantação. Entretanto, notou-se a presença de muitos defeitos e uma infraestrutura deteriorada no geral, com características parecidas com os trechos do Bairro José Américo. A figura 26 ilustra o trecho A1.



**Figura 26 - Trecho A1.**

Já os trechos C1 e C2 estão localizados na Avenida Cabo Branco, na orla de João Pessoa. Estes são ciclovias, com pavimento de concreto, que tiveram implantação no ano de 2010. Contudo, por estarem presentes em uma área turística da cidade, recebem manutenções com mais frequência. A figura 27 apresenta o trecho C1.



**Figura 27 - Trecho C1.**



Finalmente, os trechos B1, B2 e B3 localizam-se na Torre, mais precisamente na Avenida Beira-Rio, a qual liga uma área litorânea ao centro da cidade. Estes são ciclovias, com pavimento de concreto, que foram implantadas no ano de 2018, apresentando assim boas condições atuais. A figura 28 mostra os trechos B2 e B1.



**Figura 28 - Trechos B2 e B1.**

#### **4.2 Levantamento da irregularidade longitudinal com o MERLIN**

O levantamento da irregularidade longitudinal dos pavimentos dos trechos foi realizado com o MERLIN, seguindo o procedimento descrito pelo *TRL report 229* (1996). Este equipamento era manipulado pelo operador, o qual movia-o por todo o trecho de 100 m, tendo a ajuda de um outro para a anotação das medidas.

Como foi descrito no método, para o cálculo do IRI realizaram-se 200 medidas sucessivas com um espaçamento de 0,5 m. Após o levantamento de campo, calculou-se o IRI para os 20 trechos em estudo. As tabelas 6 e 7 apresentam o IRI dos trechos, separando-os em ciclovias e ciclofaixas, como também a sua classificação segundo o DNIT (2006).

**Tabela 6 – IRI para as ciclovias.**

<b>Ciclovias</b>	<b>Ano de Abertura</b>	<b>IRI (m/km)</b>	<b>Classificação (DNIT, 2006)</b>
A1	-	7,40	Péssimo
A2	-	6,74	Péssimo
B1	2018	4,17	Ruim
B2	2018	4,57	Ruim
B3	2018	4,27	Ruim
C1	2010	3,81	Ruim
C2	2010	3,08	Regular
J1	2009	5,78	Péssimo
J2	2009	6,75	Péssimo
J3	2009	9,42	Péssimo

De acordo com a tabela 6, observa-se que os trechos em melhores condições são B1, B2, B3, C1 e C2, justamente aqueles que foram implantados recentemente ou que sofreram algum tipo de manutenção. Já os trechos A1, A2, J1, J2 e J3 apresentaram os piores valores de IRI, recebendo a classificação "péssimo", segundo escala do DNIT (2006). Vale salientar que essa classificação é utilizada para rodovias, podendo não ser condizente com a realidade para infraestruturas cicloviárias, pois há uma diferença entre o tipo de transporte e a velocidade.

**Tabela 7 – IRI para as ciclofaixas.**

<b>Ciclofaixa</b>	<b>Ano de Abertura</b>	<b>IRI (m/km)</b>	<b>Classificação (DNIT, 2006)</b>
H1	2009	2,22	Bom
H2	2009	2,30	Bom
P1	2017	4,05	Ruim
P2	2017	2,69	Bom
P3	2017	2,56	Bom
V1	2011	2,98	Regular
V2	2011	7,43	Péssimo
V3	2011	3,27	Regular
V4	2011	5,84	Péssimo
V5	2011	3,57	Ruim

Já observando a tabela 7, pode-se notar que os trechos em melhores condições são H1, H2, P1 e P2, os quais foram implantados a pouco tempo ou receberam manutenção. Os trechos do Bairro Valentina apresentaram os piores valores de IRI, isso pode ser explicado pelo fato de ser uma área comercial bastante movimentada, onde os automóveis, muitas vezes, usam a infraestrutura destinada aos ciclistas.



Fazendo uma comparação entre os trechos em ciclovias e ciclofaixas, é notório que os pavimentos das ciclofaixas estão em melhores condições. Situação que pode ser explicada pela característica da ciclofaixa, a qual é uma infraestrutura integrada ao pavimento da via urbana que recebe atividades de manutenção com mais frequência. Outro fator que pode influenciar são as falhas no processo construtivo do pavimento de concreto.

### 4.3 Medidas de vibração com *Smartphones*

As medidas de vibração foram realizadas utilizando-se um sistema de medição composto por um *smartphone*, dois aplicativos pré-instalados que retornam valores de aceleração vertical, um suporte para fixar o aparelho no guidão das duas bicicletas e um ciclista experiente para conduzi-las.

Seguindo o que foi descrito no método, após ter os aplicativos instalados no *smartphone*, um suporte escolhido para fixá-lo nas bicicletas, de modo que não sofra “flutuações” e o sistema montado, começou-se a etapa de campo.

A primeira atividade realizada antes de todos os levantamentos nos trechos foi o nivelamento do *smartphone* e a verificação da frequência de atualização dos dados dos aplicativos. Na tabela 8 é mostrado um exemplo desse procedimento feito no trecho V1.

**Tabela 8 – Exemplo do nivelamento do *smartphone*.**

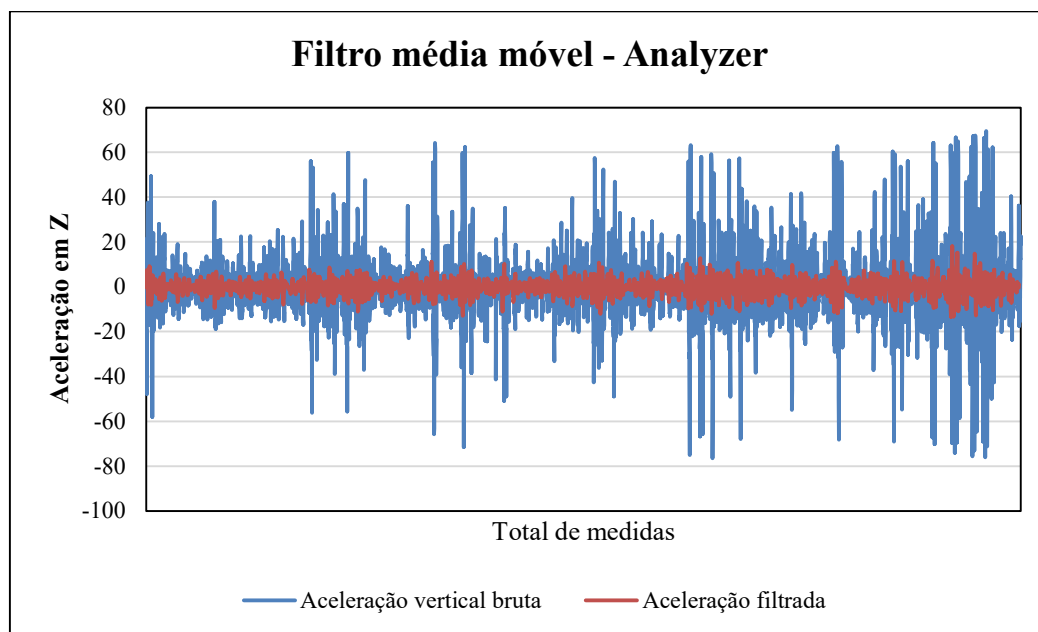
<b>Medidas</b>	<b><i>Analyzer</i></b>	<b><i>AndroSensor</i></b>
Total	3.177	602
Tempo (s)	8	6
Frequência de coleta (Hz)	398,125	100,33
Velocidade (km/h)	0	0
Média da aceleração em Z (m/s <sup>2</sup> )	0,000058	0,006

De acordo com a tabela 8, pode-se notar que o nivelamento é realizado com a bicicleta parada, representada pela velocidade igual a zero, em que se verifica a aceleração no eixo “z”. Esta deve retornar valores próximos de zero, já que não sofre nenhuma perturbação. Logo, é visto no exemplo que o *smartphone* está nivelado. Além disso, a frequência de coleta, resultado do total de medidas dividido pelo tempo, também foi verificada, sendo que o *Accelerometer Analyzer* teve uma frequência em torno de 400 Hz e o *AndroSensor* em torno de 100 Hz. Com isso, pode-se concluir que o *Accelerometer Analyzer* retorna mais dados que o *AndroSensor*.

Após todos os levantamentos nos trechos, partiu-se para o cálculo do RMS, que é o índice que representa a vibração. Para isso, os dados brutos de aceleração no eixo “z”

passaram por um processamento definido no método. O primeiro procedimento é a retirada dos dados do primeiro e último 1,5 segundo de cada medição, visando diminuir possíveis alterações referentes aos comandos dados na tela do *smartphone* pelo ciclista para iniciar e parar a gravação dos aplicativos.

O segundo procedimento foi a aplicação do filtro de média móvel, que serve para diminuir os ruídos, os erros aleatórios e atenuar os picos de frequência. Utilizou-se nesse filtro um intervalo de 20 janelas. A figura 29 exemplifica a aplicação do filtro de média móvel no trecho A1, onde utilizou-se o *Accelerometer Analyzer* e a bicicleta mais rígida.



**Figura 29** - Aplicação do filtro de média móvel.

De acordo com o gráfico da figura 29, pode-se notar uma atenuação nos picos de frequência. Entretanto os dados de aceleração mantêm o mesmo padrão de envoltória, cujos picos máximos de frequência permanecem nos mesmos locais após a aplicação do filtro.

Por fim, o RMS dos 20 trechos foi calculado , considerando os dois aplicativos e as duas bicicletas. Os resultados estão apresentados nas tabelas 9 e 10, separados em ciclovias e ciclofaixas, respectivamente.

**Tabela 9 – RMS para as ciclovias.**

<b>Ciclovias</b>	<b>Bike 1 (Andro)</b>	<b>Bike 2 (Andro)</b>	<b>Bike 1 (Analyzer)</b>	<b>Bike 2 (Analyzer)</b>
A1	1,82	2,90	3,40	3,52
A2	1,52	2,60	2,80	3,10
B1	0,70	0,90	0,73	1,05
B2	0,95	1,40	1,30	1,50
B3	0,85	1,02	0,745	1,20
C1	0,61	0,86	0,60	0,92
C2	0,49	0,62	0,45	0,80
J1	1,37	2,15	2,32	2,70
J2	1,55	2,66	2,80	3,15
J3	2,20	3,30	4,10	4,20

É possível notar na tabela 9 os valores de RMS referentes aos trechos em ciclovias. Os valores, que são a média de duas passagens, diferem de aplicativo para aplicativo e de acordo com o modelo de bicicleta utilizado. Observa-se que o sistema de medição com a bicicleta mais rígida (Bike 2) retornou valores maiores, assim como o aplicativo *Accelerometer Analyzer*. Contudo, os trechos com maiores vibrações no geral são: A1, A2, J1, J2 e J3.

**Tabela 10 – RMS para as ciclofaixas.**

<b>Ciclofaixa</b>	<b>Bike 1 (Andro)</b>	<b>Bike 2 (Andro)</b>	<b>Bike 1 (Analyzer)</b>	<b>Bike 2 (Analyzer)</b>
H1	0,71	1,22	0,70	1,00
H2	0,76	1,27	0,78	1,11
P1	1,37	2,23	1,68	1,92
P2	0,86	1,40	0,94	1,26
P3	0,80	1,34	0,87	1,17
V1	0,93	1,58	1,10	1,30
V2	2,21	3,42	2,95	3,32
V3	1,15	1,73	1,21	1,33
V4	1,52	2,81	2,00	2,30
V5	1,20	1,78	1,33	1,50

De acordo com a tabela 10, confirma-se as análises feitas anteriormente em relação às bicicletas, entretanto o aplicativo *AndroSensor* retornou valores maiores que o *Accelerometer Analyzer*. Logo, pode-se afirmar que a escolha dos aplicativos pode interferir nos valores de vibração e que quanto mais rígida a bicicleta, maior será o valor de RMS. Contudo, os trechos H1, H2, P1 e P2 apresentaram as menores vibrações no ciclismo.

Decidiu-se fazer um teste de hipóteses para verificar se existe igualdade de valores entre os aplicativos, pois mesmo retornando valores diferentes, estes não têm tanta discrepância. Foi aplicado o teste *t de Student* para duas populações independentes, cuja hipótese nula ( $H_0$ ) é que as médias são iguais entre si.

O teste de hipóteses retornou *p-values* de 0,4475 para a análise entre “Bike 1 (Andro)” e “Bike 1 (Analyzer)”, e 0,4376 para a análise entre “Bike 2 (Andro)” e da “Bike 2 (Analyzer)”. Isso significa que não há motivos para rejeitar  $H_0$  ao nível de significância de 5%, logo, há evidência suficiente para afirmar que os aplicativos retornam valores médios similares.

#### 4.4 Avaliação subjetiva com os ciclistas

A avaliação subjetiva foi realizada por cinco ciclistas, os quais percorreram todos os trechos em suas bicicletas. Imediatamente após percorrê-los, atribuíram notas de 0 (Extremamente desconfortável) a 5 (Extremamente confortável), e opinaram se os segmentos eram aceitáveis ou não.

Com o fim da etapa de campo, os dados foram digitalizados e foi realizada a sua estatística descritiva. A tabela 11 apresenta as notas dadas pelos avaliadores nos trechos de ciclofaixas e a sua estatística descritiva.

**Tabela 11** – Notas dos avaliadores para as ciclofaixas.

<b>Ciclofaixa</b>	<b>AV 1</b>	<b>AV 2</b>	<b>AV 3</b>	<b>AV 4</b>	<b>AV 5</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
H1	4,6	4,6	4,8	4,7	5,0	4,74	0,167	2,8
H2	4,5	4,4	4,3	4,5	4,8	4,50	0,187	3,5
P1	4,0	4,2	4,2	4,0	4,0	4,08	0,110	1,2
P2	4,5	4,6	4,8	4,2	4,8	4,58	0,249	6,2
P3	4,5	4,7	4,9	4,2	4,9	4,64	0,297	8,8
V1	3,5	4,2	4,2	3,4	4,0	3,86	0,385	14,8
V2	2,5	2,9	3,0	2,0	2,0	2,48	0,476	22,7
V3	4,5	4,3	4,4	3,3	3,9	4,08	0,492	24,2
V4	3,5	3,7	3,5	3,7	2,8	3,44	0,371	13,8
V5	4,0	4,2	3,9	3,8	3,7	3,91	0,201	4,1

As notas de cada trecho são dadas pela média entre as notas dos avaliadores, como pode ser visto na tabela 11, sendo que os trechos mais bem avaliados foram H1, H2, V3, P1, P2 e P3. Já o trecho V2 foi o que mais se distanciou da média, tendo a pior avaliação. É possível notar também uma maior variação nas notas referentes a V1, V2, V3 e V4,

indicando que não se mantém uma constância de opiniões quando se trata de trechos mais deteriorados.

A tabela 12 apresenta as notas dadas pelos avaliadores nos trechos de ciclovias e a sua estatística descritiva.

**Tabela 12 – Notas dos avaliadores para as ciclovias.**

<b>Ciclovias</b>	<b>AV 1</b>	<b>AV 2</b>	<b>AV3</b>	<b>AV 4</b>	<b>AV 5</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
A1	2,0	2,0	2,7	2,9	1,8	2,28	0,487	23,7
A2	2,0	2,2	2,7	2,9	2,1	2,38	0,396	15,7
B1	4,6	4,5	4,5	4,0	4,3	4,38	0,239	5,7
B2	4,5	4,6	4,4	4,0	4,1	4,32	0,259	6,7
B3	4,6	4,5	4,5	4,2	4,1	4,38	0,217	4,7
C1	4,0	4,2	4,3	4,0	4,1	4,12	0,130	1,7
C2	4,8	4,9	4,8	4,0	4,4	4,58	0,377	14,2
J1	3,8	3,8	3,6	2,9	2,8	3,38	0,492	24,2
J2	3,2	3,0	2,9	2,4	2,3	2,76	0,391	15,3
J3	1,9	2,2	2,5	1,9	1,3	1,96	0,445	19,8

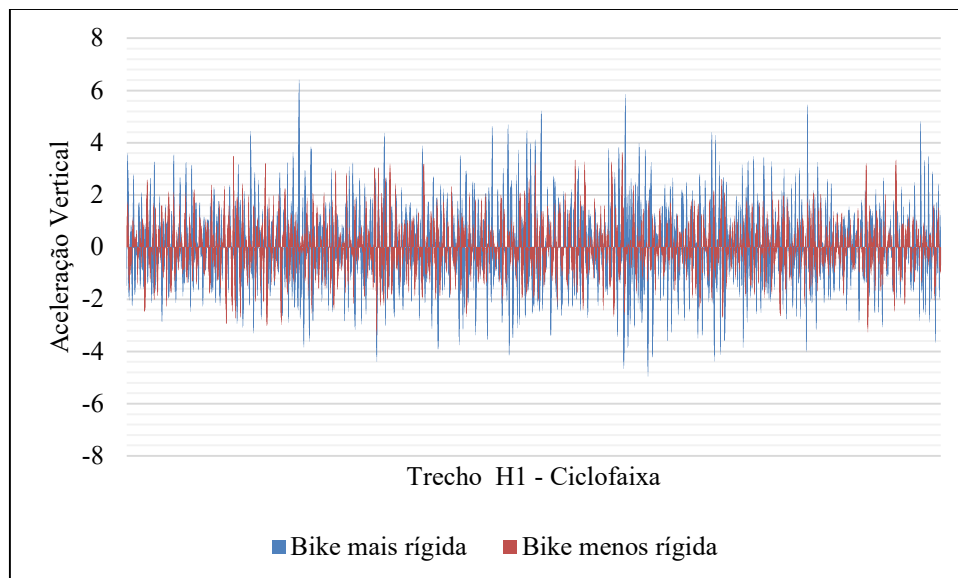
De acordo com a tabela 12, os melhores trechos para os ciclistas são C1, C2, B1, B2 e B3. Pode-se confirmar também que as notas dos ciclistas em relação aos trechos em piores condições são as que mais variam, indicando que a diferença de percepção neste caso é mais forte. Isso pode ser explicado pelo fato de ter ciclistas mais experientes que outros na avaliação, os quais estão mais acostumados a enfrentar situações adversas. Por fim, todos os ciclistas rejeitaram trechos com notas abaixo de 2,5.

Ainda foi verificada a confiabilidade das respostas dos ciclistas pelo Alfa de Cronbach, teste muito utilizado por pesquisadores. Os alfas obtidos foram 0,87 para as notas e 0,7 para a aceitabilidade, indicando que as respostas são confiáveis, já que valores acima de 0,7 expressam confiança.

## 4.5 Tratamento estatístico e análise dos dados

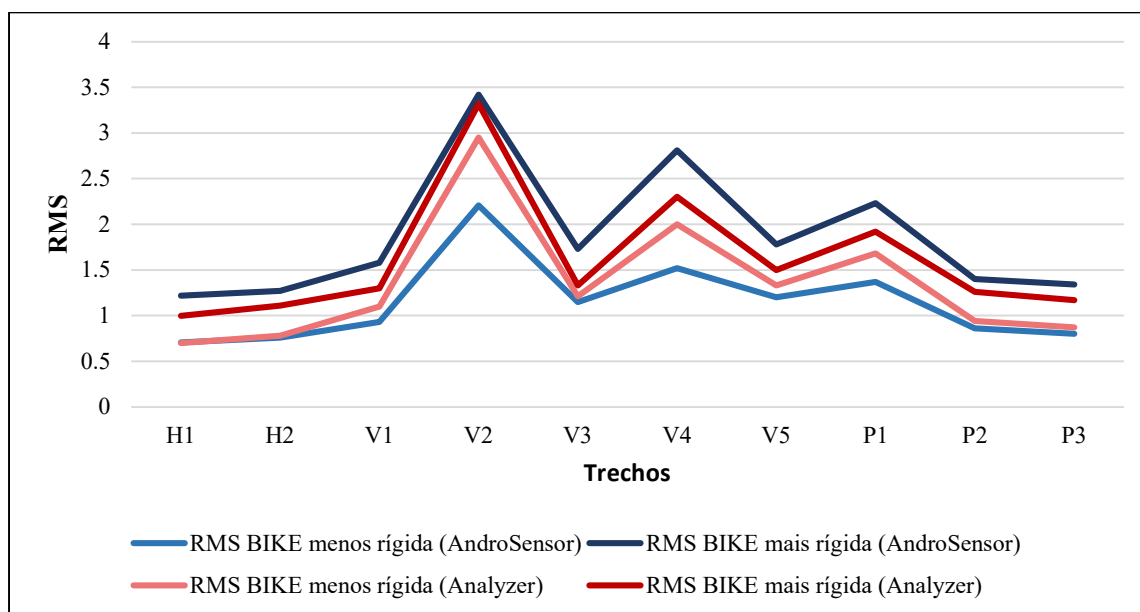
### 4.5.1 Comparação entre as bicicletas

Comparou-se as duas bicicletas utilizadas nesta pesquisa, com o objetivo de identificar qual retorna maiores valores de vibração e automaticamente se apresenta como a pior situação para o ciclista em relação ao conforto. A figura 30 apresenta os dados de aceleração vertical coletados no trecho H1 para a bicicleta mais rígida e a menos rígida.

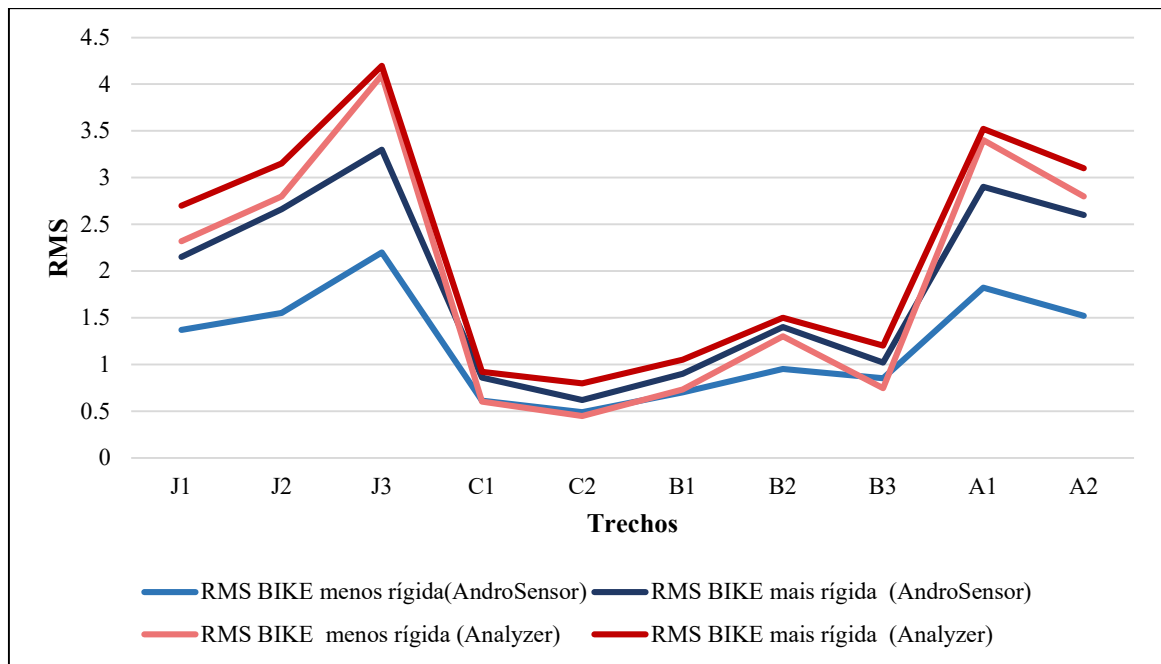


**Figura 30** - Aceleração vertical para as duas bicicletas no trecho H1.

Como é possível notar na figura 30, a bicicleta mais rígida, representada pela cor azul, foi a que retornou os maiores valores de aceleração vertical, possivelmente pelo fato do sistema de suspensão atenuar o impacto da irregularidade presente no pavimento. Logo, a bike mais rígida proporciona um menor conforto para os ciclistas. Isso pode ser visto também nas figuras 31 e 32, que trazem os valores de RMS em todos os trechos.



**Figura 31** - RMS nas ciclofaixas.



**Figura 32 - RMS nas ciclovias.**

De acordo com as figuras 31 e 32, pode-se constatar que bicicletas mais rígidas resultam em vibrações maiores, independentemente do aplicativo utilizado para coletar aceleração. Portanto, utilizou-se os valores da bicicleta mais rígida para definição da escala de conforto, além da sua utilização no estudo de caso, pois foi a que expôs o ciclista a pior situação.

#### 4.5.2 Comparação entre os aplicativos

A comparação entre os aplicativos foi realizada pela frequência de coleta de dados, por uma análise de repetitividade dos dados de RMS e por uma análise de repetibilidade dos dados de aceleração no eixo “z”.

Como foi mostrado anteriormente, o aplicativo *Accelerometer Analyzer* possui uma frequência de coleta de 400 Hz, enquanto o *AndroSensor* coleta dados com uma frequência de 100 HZ. Portanto, o *Accelerometer Analyzer* se mostrou mais interessante neste aspecto, já que taxas maiores de aquisição de dados são mais indicadas em estudos deste tipo e podem retratar com mais fidelidade a realidade, devido um maior número de medidas por segundo.

As tabelas 13 e 14 apresentam os valores de RMS das duas passagens nos trechos em ciclofaixa, para os aplicativos *AndroSensor* e *Accelerometer Analyzer*, respectivamente. Essas medições foram com a bicicleta rígida.

**Tabela 13** – RMS nas ciclofaixas com o *AndroSensor*.

<b>Ciclofaixa</b>	<b>RMS 1 (<i>AndroSensor</i>)</b>	<b>RMS 2 (<i>AndroSensor</i>)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
H1	1,10	1,34	1,22	0,170	0,9
H2	1,23	1,31	1,27	0,057	0,3
P1	2,10	2,36	2,23	0,184	3,4
P2	1,60	1,20	1,40	0,283	8,0
P3	1,12	1,56	1,34	0,311	9,7
V1	1,30	1,86	1,58	0,396	15,7
V2	3,20	3,64	3,42	0,311	9,7
V3	1,90	1,56	1,73	0,240	5,8
V4	2,91	2,71	2,81	0,141	2,0
V5	1,54	2,02	1,78	0,339	11,5

**Tabela 14** – RMS nas ciclofaixas com o *Accelerometer Analyzer*.

<b>Ciclofaixa</b>	<b>RMS 1 (<i>Analyzer</i>)</b>	<b>RMS 2 (<i>Analyzer</i>)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
H1	1,01	1,00	1,00	0,007	0,0
H2	1,11	1,10	1,10	0,007	0,0
P1	1,83	2,01	1,92	0,127	1,6
P2	1,22	1,30	1,26	0,057	0,3
P3	1,13	1,21	1,17	0,057	0,3
V1	1,39	1,21	1,30	0,127	1,6
V2	3,41	3,22	3,31	0,134	1,8
V3	1,42	1,24	1,33	0,127	1,6
V4	2,46	2,14	2,30	0,226	5,1
V5	1,55	1,45	1,50	0,071	0,5

Com base nas tabelas 13 e 14 é possível notar que os valores de RMS variaram mais com o aplicativo *AndroSensor*, apresentando assim uma menor repetitividade. Portanto, os dados provenientes do *Accelerometer Analyzer* se mostram mais consistentes.

A tabela 15 traz uma amostra do início da medição das vibrações no trecho A1 com os dois aplicativos.



**Tabela 15** – Amostra de aceleração do trecho A1.

<i>AndroSensor</i>	<i>Accelerometer Analyzer</i>
-12,0489	-7,092
-12,0489	-1,693
-26,8265	3,895
-3,7471	6,986
-3,7471	9,553
16,3085	8,472
16,3085	6,137
0,3127	4,017
0,3127	3,331
-17,0394	4,575
-2,8639	5,695
15,1884	5,346
15,1884	1,972
6,9781	-3,996
-9,324	-7,96
-9,324	-8,685
-12,1846	-6,871
0,2173	-6,034
12,0744	-5,141
12,0744	-5,217
0,2828	-6,561
0,2828	-5,449
0,4749	-4,984
1,4363	-3,157
1,4363	-0,777
2,0766	1,699
2,0766	5,182
3,3419	5,54
3,3419	5,347
-7,9782	6,265
2,1098	4,822
2,1098	3,878
12,213	4,045
-3,3736	2,858
-3,3736	5,299
-3,134	4,005
-3,134	2,033
3,0536	0,248
3,0536	-3,224
-0,8366	-4,023

De acordo com a tabela 15, observa-se que os dados coletados com o *AndroSensor* se repetem muito, não retratando bem o que acontece na realidade. Como é possível notar, em uma amostra de 40 dados, 15 repetiram o seu valor. Contudo, conclui-se que entre os

dois aplicativos, o *Accelerometer Analyzer* é o mais indicado para medir as vibrações no ciclismo, o qual foi utilizado para definição das escalas de conforto e no estudo de caso.

#### 4.5.3 Correlação

Foi verificada a correlação entre os valores de IRI, RMS e a Avaliação Subjetiva dos ciclistas, visando identificar qual a força de associação entre essas variáveis. Esta análise foi realizada com o *software* R. A tabela 16 apresenta os coeficientes de correlação  $R^2$  e  $R^2$  ajustado entre as variáveis, em que valores mais próximos de 1 significam uma forte correlação.

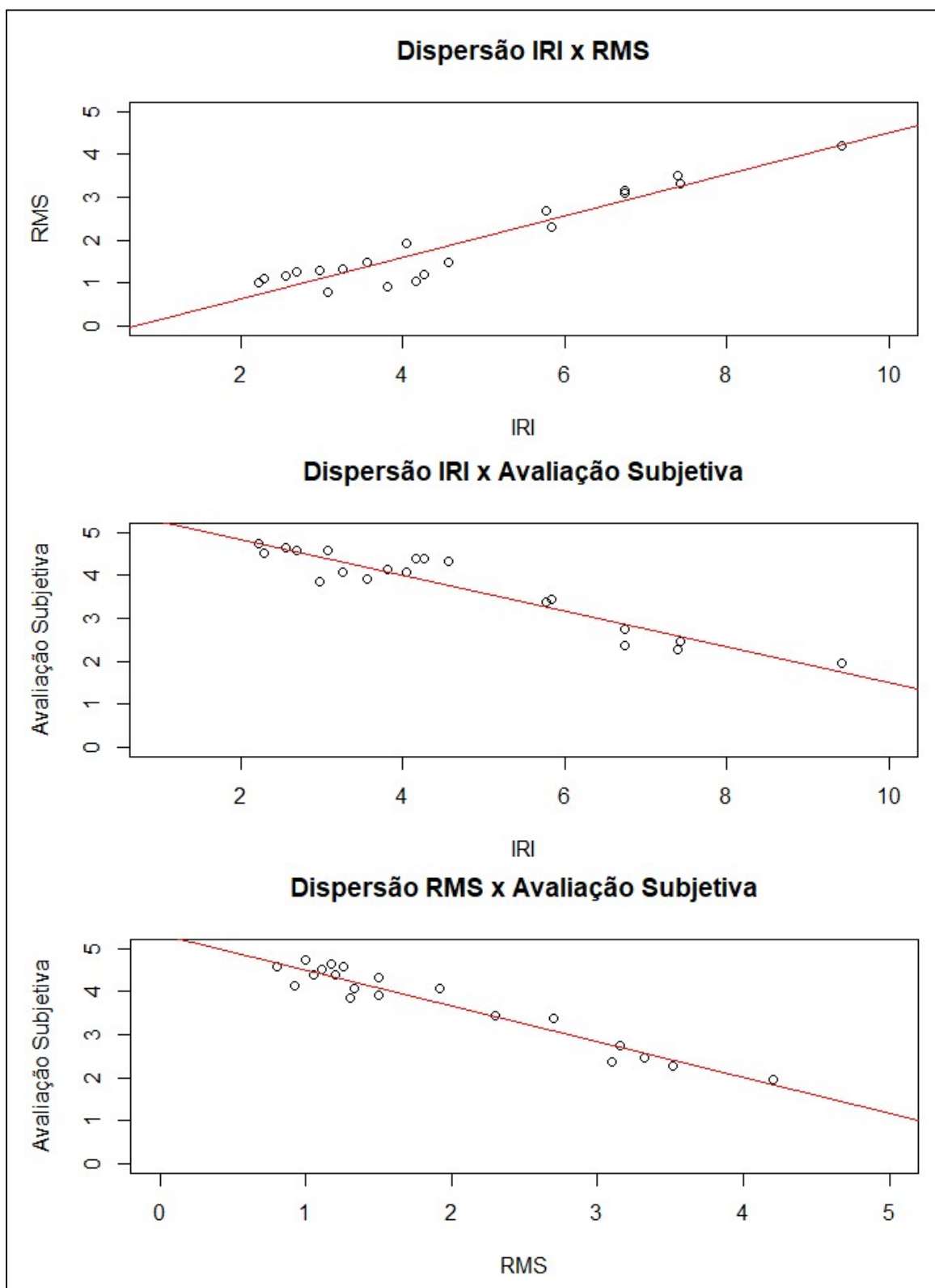
**Tabela 16** – Correlação entre as variáveis.

Correlação	$R^2$	$R^2$ ajustado
IRI x RMS	0,9012	0,8957
IRI x Avaliação subjetiva	0,8865	0,8802
RMS x Avaliação subjetiva	0,9285	0,9245

De acordo com a tabela 16, pode-se observar que as variáveis apresentam forte correlação, cujos valores de  $R^2$  e  $R^2$  ajustado são próximos ou acima de 0,9. A maior correlação encontrada foi entre o RMS e a Avaliação Subjetiva, possuindo  $R^2$  ajustado de 0,9245, significando que os valores de RMS explicam 92% dos valores da Avaliação Subjetiva e que o modelo de regressão se ajusta bem aos dados.

#### 4.5.4 Gráficos de dispersão

Para ilustrar a correlação entre as variáveis foram plotados gráficos de dispersão, os quais estão apresentados na figura 33.



**Figura 33** - Gráficos de dispersão entre as variáveis.

De acordo com os gráficos da figura 33, pode-se confirmar que existe correlação negativa entre o IRI e RMS com a Avaliação Subjetiva, ou seja, o acréscimo de valores

de IRI e RMS resultam decréscimo das notas atribuídas pelos ciclistas. Ainda, a correlação entre IRI e RMS é positiva, o que implica numa relação diretamente proporcional entre essas variáveis. Portanto, entende-se que pavimentos mais irregulares provocam vibrações maiores, o que significa em viagens desconfortáveis para os ciclistas.

#### 4.5.5 Regressão linear

Foi realizada uma regressão linear entre as variáveis, buscando estimar as equações de previsibilidade dos modelos, cuja variável independente consegue estimar a variável dependente. A seguir, na figura 34, é apresentado o resultado da regressão feita no *software* R com o modelo já ajustado.

```
> summary(ajuste1)
Call:
lm(formula = iri ~ rms)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.8406 -0.5359 -0.2108  0.5184  1.1412

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.0727    0.3153   3.402  0.00318 **
rms          1.8630    0.1454  12.812 1.75e-10 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.6582 on 18 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9012,    Adjusted R-squared:  0.8957

> summary(ajuste2)
Call:
lm(formula = AvaliaçãoSubjetiva ~ iri)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.57252 -0.21883  0.02937  0.18988  0.54642

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  5.66751    0.17657  32.10 < 2e-16 ***
iri         -0.41443    0.03495 -11.86 6.12e-10 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.3105 on 18 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8865,    Adjusted R-squared:  0.8802

> summary(ajuste3)
Call:
lm(formula = AvaliaçãoSubjetiva ~ rms)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.45278 -0.13436  0.02808  0.23095  0.33958

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  5.33855    0.11804  45.23 < 2e-16 ***
rms         -0.83236    0.05444 -15.29 9.35e-12 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2464 on 18 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9285,    Adjusted R-squared:  0.9245
```

**Figura 34** - Modelo de regressão linear entre as variáveis no software R.

Analisando a figura 34, pode-se formular as equações de previsibilidade dos modelos entre IRI *versus* RMS, Avaliação Subjetiva *versus* IRI e Avaliação subjetiva *versus* RMS. A seguir são apresentadas as equações da regressão linear:

- IRI x RMS

$$IRI = 1,0727 + 1,863 \times RMS$$

(6)

- Avaliação subjetiva x IRI

$$Avaliação\ Subjetiva = 5,66751 - 0,41443 \times IRI$$

(7)

- Avaliação subjetiva x RMS

$$Avaliação\ Subjetiva = 5,33855 - 0,83236 \times RMS$$

(8)

Foi necessário ajustar as equações 7 e 8, pois a escala das avaliações subjetivas varia entre 0 e 5. Para realizar o ajuste, foi realizada a multiplicação do parâmetro da variável independente pela relação 5/intercepto. Desse modo, as equações 9 e 10 foram obtidas:

- Avaliação subjetiva x IRI

$$Avaliação\ Subjetiva = 5 - 0,366 \times IRI$$

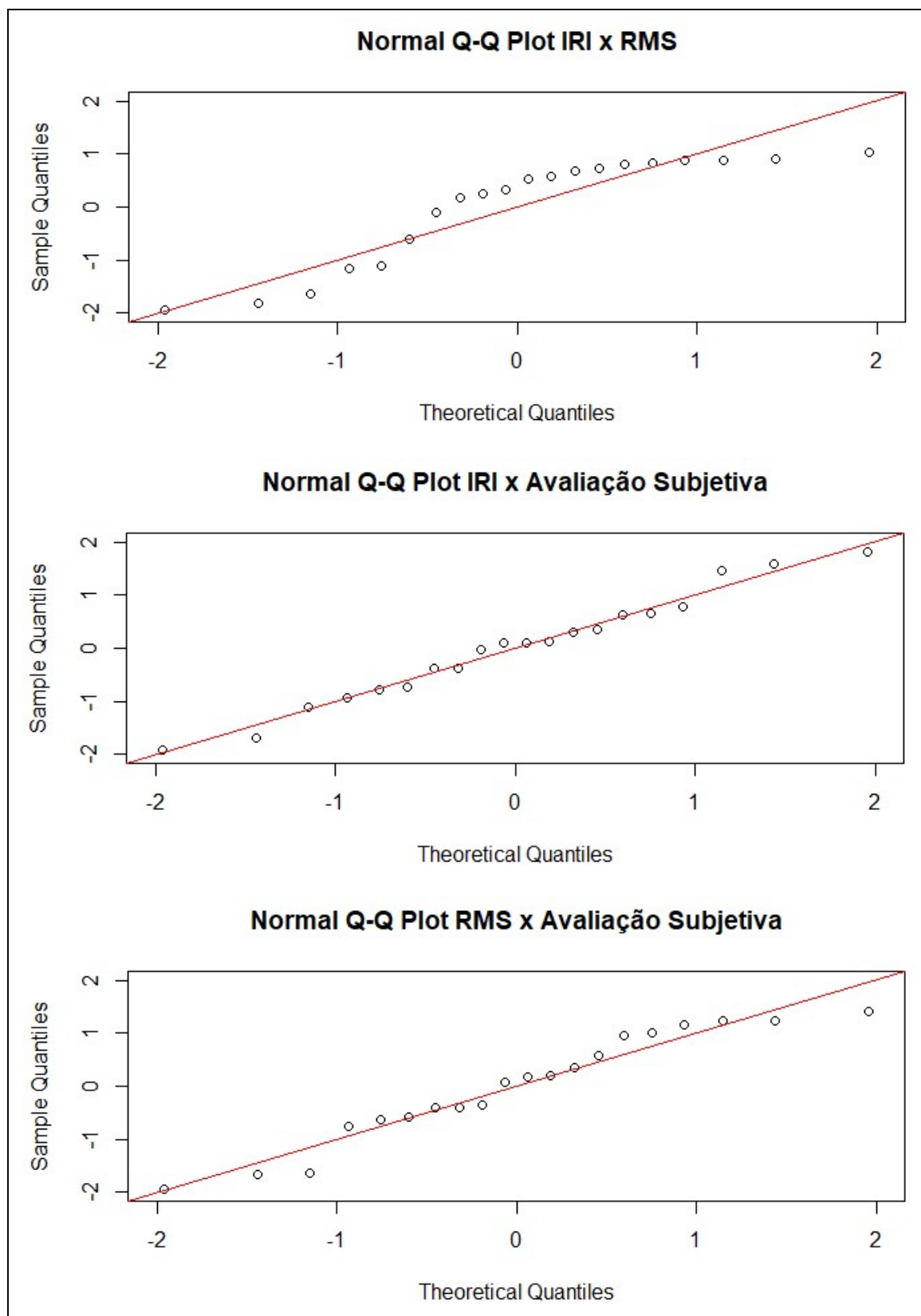
(9)

- Avaliação subjetiva x RMS

$$Avaliação\ Subjetiva = 5 - 0,7796 \times RMS$$

(10)

Com essas equações é possível prever os valores das variáveis dependentes com base nos valores das variáveis independentes, pois como já foi mostrado, estas possuem forte correlação. Visando verificar a consistência dos modelos, aplicou-se os métodos da normalidade e do gráfico resíduos *versus* valores ajustados. Os gráficos do método da normalidade são apresentados na figura 35.

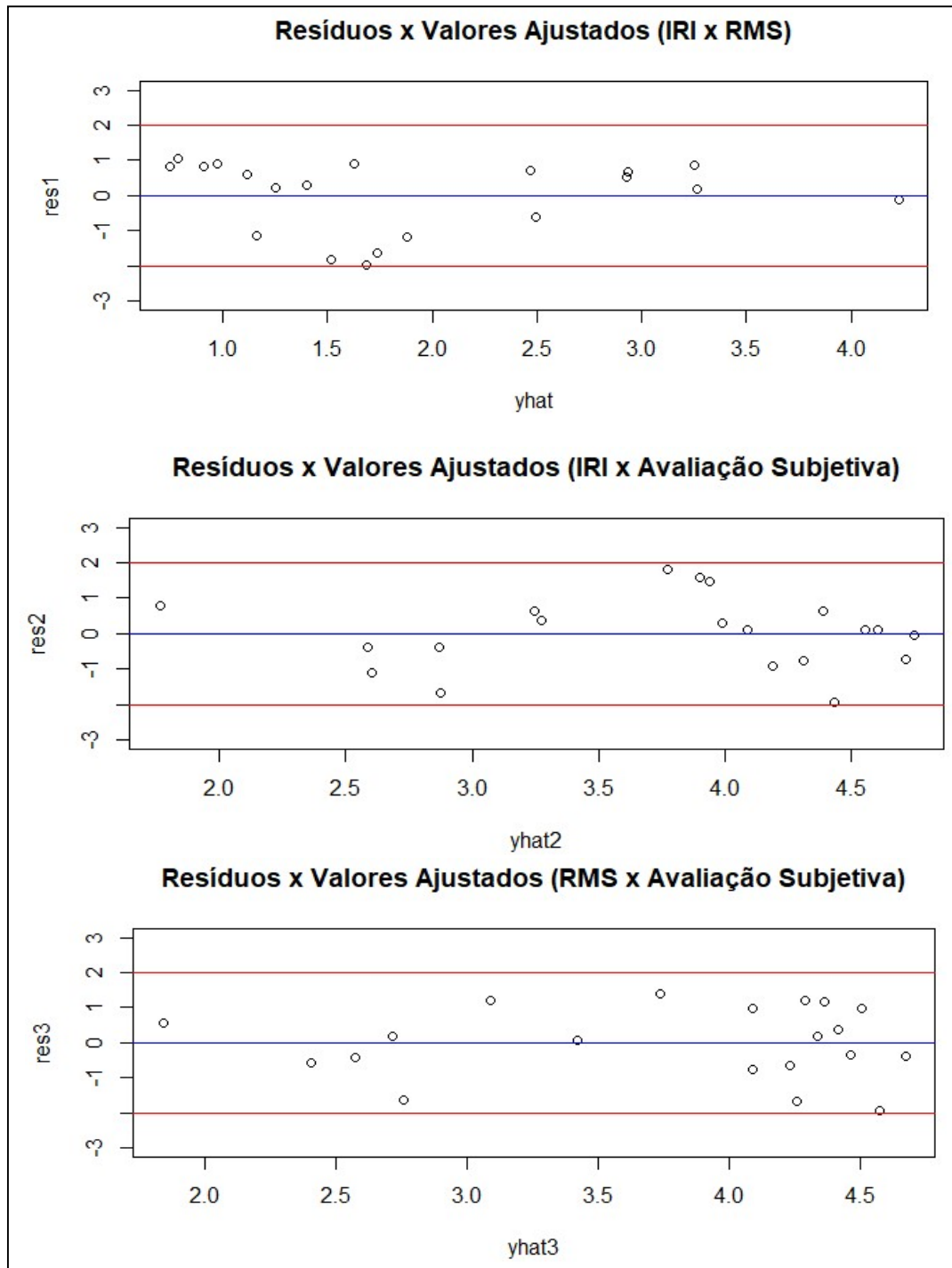


**Figura 35** - Método da normalidade para verificação dos modelos.

Os gráficos apresentados na figura 35 permitem verificar se os erros são normalmente distribuídos, plotando os resíduos escalonados em ordem crescente *versus* os

*quantis* da distribuição normal padrão, cujo indica normalidade quando os pontos estão aproximadamente em linha reta de 45 °. Portanto, observa-se que os modelos estão em normalidade, contudo a relação IRI x RMS foi a que mais se distanciou da reta de igualdade.

A figura 36 apresenta os gráficos dos resíduos *versus* valores ajustados.



**Figura 36** - Gráficos dos resíduos *versus* valores ajustados para verificação dos modelos.

Os gráficos apresentados na figura 36 detectam inadequações no modelo, como *outliers* e a heterocedasticidade. Estes indicam que não há indícios de problemas no modelo se os resíduos estiverem contidos de forma aleatória em uma faixa horizontal. Logo, observando os gráficos, verifica-se que os resíduos se mantêm dentro da faixa horizontal, confirmando assim a consistência dos modelos.

#### 4.5.6 Definição das escalas de conforto

Primeiramente, para definição das escalas de conforto, foram geradas tabelas de frequências por classes considerando os valores de RMS e IRI obtidos para os 20 trechos. A seguir, na figura 37, são apresentadas as tabelas de frequências obtidas com o *software* R.

> r #intervalos de frequencia rms						> i #intervalos de frequencia iri							
Class	limits	f	rf	rf(%)	cf	cf(%)	Class	limits	f	rf	rf(%)	cf	cf(%)
[0.792,1.37)		10	0.50	50	10	50	[2.198,3.417)		7	0.35	35	7	35
[1.37,1.94)		3	0.15	15	13	65	[3.417,4.637)		6	0.30	30	13	65
[1.94,2.52)		1	0.05	5	14	70	[4.637,5.856)		2	0.10	10	15	75
[2.52,3.09)		1	0.05	5	15	75	[5.856,7.075)		2	0.10	10	17	85
[3.09,3.67)		4	0.20	20	19	95	[7.075,8.295)		2	0.10	10	19	95
[3.67,4.24)		1	0.05	5	20	100	[8.295,9.514)		1	0.05	5	20	100

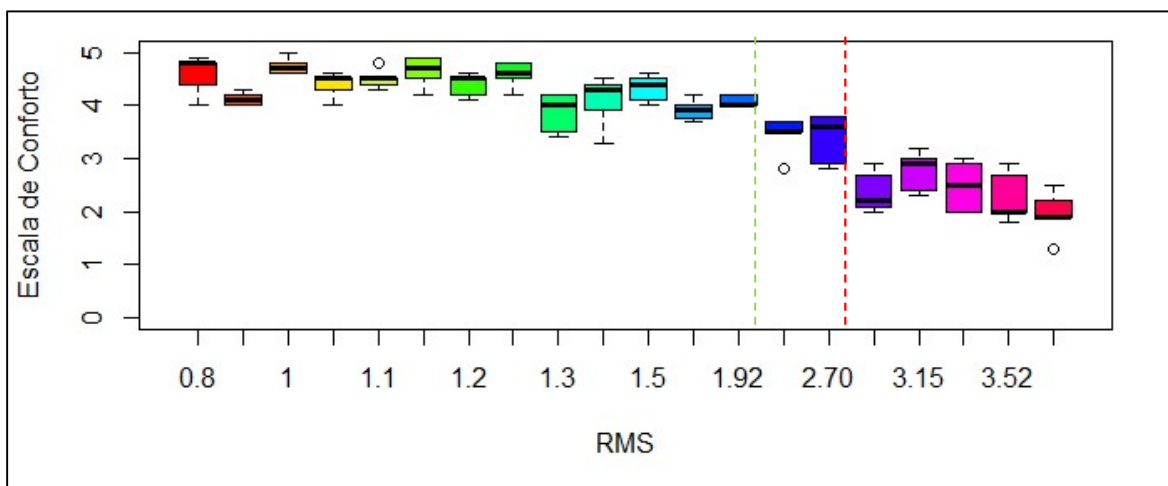
**Figura 37** - Tabelas de frequências obtidas com o R para os valores de RMS e IRI.

As tabelas de frequências dividem os valores em classes estabelecidas pelas análises do *software*. Como pode ser visto na figura 37, os valores foram divididos em seis classes, com o intervalo de 0,57 para o RMS e de 1,21 para o IRI. Em cada classe são contabilizados a quantidade de valores existentes, como por exemplo na primeira classe do RMS existem 10 valores. Essas tabelas serão confrontadas com os gráficos *Boxplot* para a definição das escalas de conforto.

##### 4.5.6.1 Escala de conforto em termos de RMS

A figura 38 apresenta o gráfico *Boxplot* entre os valores de RMS em *ranking* e as notas dos ciclistas referentes aos trechos.





**Figura 38** - Boxplot entre valores de RMS e a Avaliação Subjetiva.

Pode-se observar na figura 38 que os trechos com valores de RMS entre 0,8 e 1,92 são considerados pelos ciclistas como “Extremamente confortáveis”. A partir de 1,92 até 2,70 são considerados “Confortáveis” e acima de 3,10 se enquadram em “Pouco desconfortáveis”. Todavia, como não houve valores de RMS que fossem considerados “Inconfortáveis” e “Extremamente desconfortáveis”, utilizou-se a predição de valores valendo-se do modelo de Regressão Linear da equação 10 para obter dados referentes a notas abaixo de 2. A tabela 17 apresenta a predição realizada no *software* R, onde foram sendo adicionados valores de RMS altos para obtenção do que seria as notas dos ciclistas com base na equação do modelo.

**Tabela 17** – Predição das notas dos ciclistas com valores de RMS.

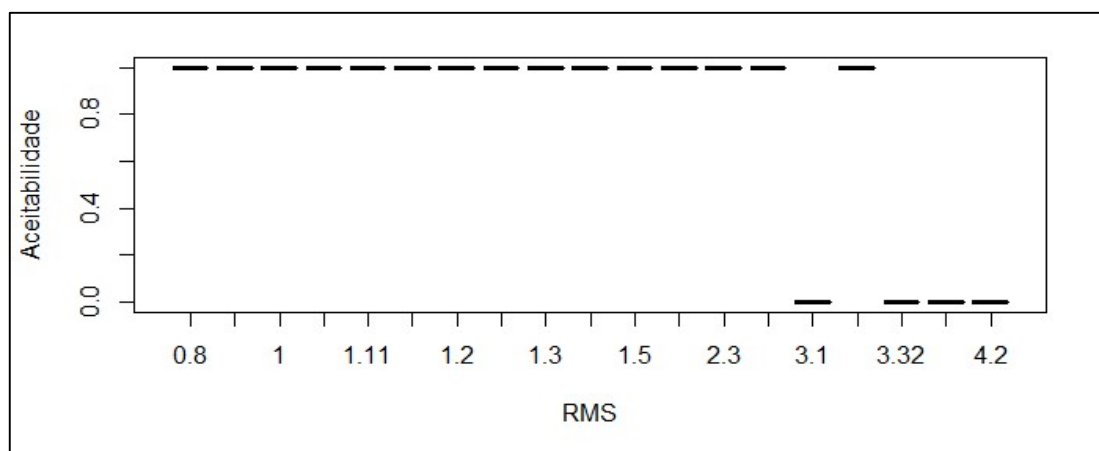
<b>RMS</b>	<b>Notas</b>
3,80	2,04
4,00	1,90
5,00	1,10
5,10	1,00

É possível notar na tabela 17 que valores de RMS acima de 4,00 até 5,10 se enquadram em “Inconfortáveis”, pois as notas ficaram no intervalo entre 2 e 1. Já valores acima de 5,10 são considerados “Extremamente desconfortáveis”. Logo, confrontando as classes da tabela de frequências do RMS, o gráfico *Boxplot* da figura 38 e a predição de valores da tabela 17, definiu-se a escala de conforto referente a vibração, a qual está apresentada na tabela 18.

**Tabela 18** – Escala de conforto de infraestruturas cicloviárias em termos de RMS.

RMS (m/s <sup>2</sup> )	Condição da infraestrutura cicloviária	Condição de conforto
0 – 1,93	Ótimo	Extremamente Confortável
1,94 – 3,08	Bom	Confortável
3,09 – 3,99	Regular	Pouco Inconfortável
4,00 – 5,10	Ruim	Inconfortável
> 5,10	Péssimo	Extremamente Inconfortável

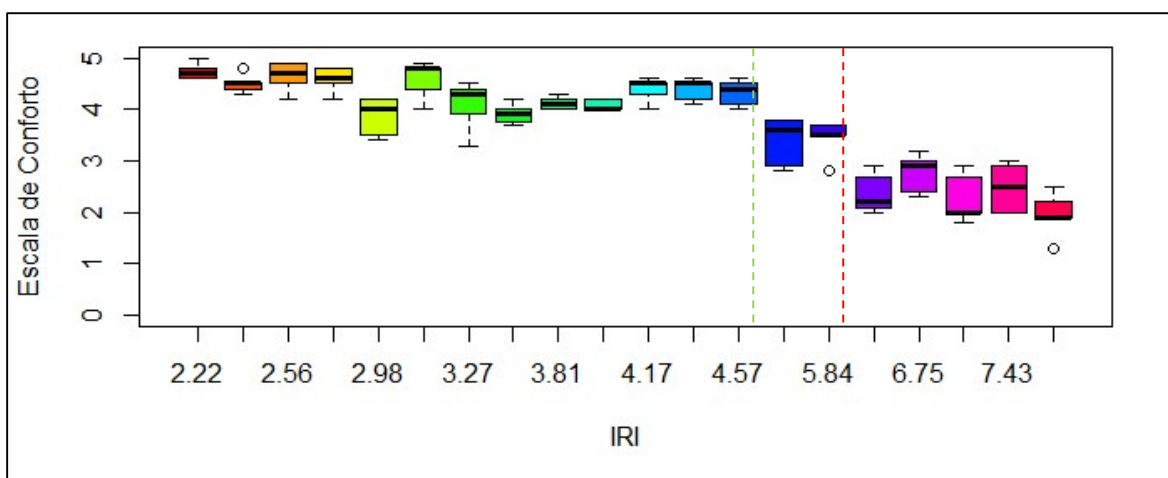
Os valores da tabela 18 podem ser usados na avaliação de infraestruturas cicloviárias, visando identificar a condição atual das vias e, a partir daí, o poder público pode definir as intervenções necessárias. Ainda foi plotado um gráfico que correlaciona as respostas dos ciclistas referentes a aceitabilidade dos trechos com os valores de RMS, o qual está exposto na figura 39.

**Figura 39** - Aceitabilidade dos trechos em termos de RMS.

Conforme a figura 39, é notório que os ciclistas não aceitaram a maioria dos trechos com valores de RMS maiores ou iguais a 3,1, sendo que apenas um trecho fugiu deste padrão. Logo, valores de RMS acima de 3,1 podem ser utilizados como gatilho para a realização de intervenções nas infraestruturas cicloviárias.

#### 4.5.6.2 Escala de conforto em termos de IRI

A figura 40 apresenta o gráfico *Boxplot* entre os valores de IRI em *ranking* e as notas dos ciclistas referentes aos trechos.



**Figura 40** - Boxplot entre valores de IRI e a Avaliação Subjetiva.

Pode-se observar na figura 40 que os trechos com valores de IRI entre 2,2 e 4,57 são considerados pelos ciclistas como “Extremamente confortáveis”. A partir de 4,57 até 5,84 são considerados “Confortáveis” e acima de 5,84 se enquadram em “Pouco desconfortáveis”. Todavia, como não houve valores de IRI que fossem considerados “Inconfortáveis” e “Extremamente desconfortáveis”, utilizou-se a predição de valores valendo-se do modelo de Regressão Linear da equação 9 para obter dados referentes a notas abaixo de 2. A tabela 19 apresenta a predição realizada no *software* R, no qual foram sendo adicionados valores de IRI mais altos para obtenção do que seria as notas dos ciclistas com base na equação do modelo.

**Tabela 19** - Predição das notas dos ciclistas com valores de IRI.

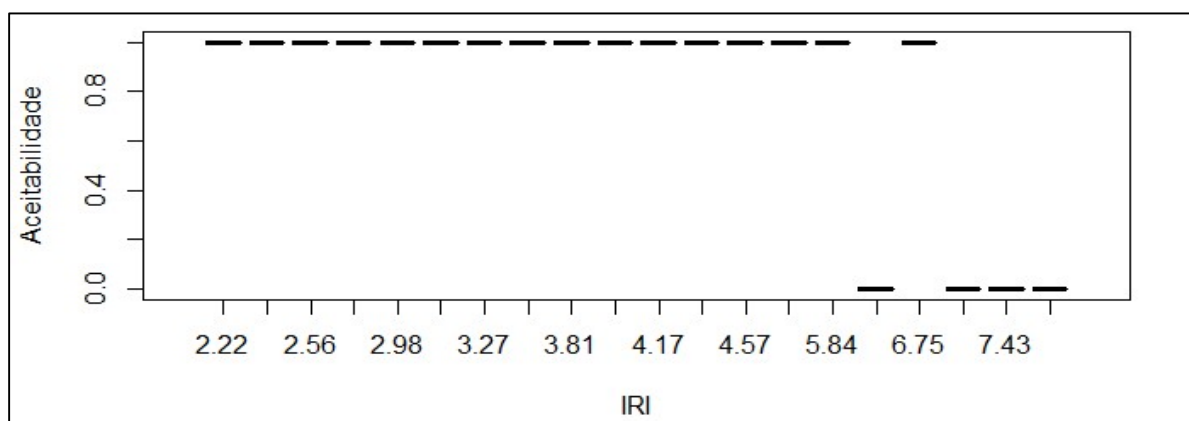
IRI	Notas
8,2	2,00
8,8	1,78
9,8	1,41
11	1,00

É possível notar na tabela 19 que valores de IRI acima de 8,2 até 11 se enquadram em “Inconfortáveis” e valores acima de 11 são considerados “Extremamente desconfortáveis”. Logo, confrontando as classes da tabela de frequências do IRI, o gráfico *Boxplot* da figura 40 e a predição de valores da tabela 19, definiu-se a escala de conforto referente a irregularidade longitudinal, a qual está apresentada na tabela 20.

**Tabela 20** – Escala de conforto de infraestruturas ciclovárias em termos de IRI.

IRI (m/km)	Condição da infraestrutura ciclovária	Condição de conforto
0 – 4,63	Ótimo	Extremamente Confortável
4,64 – 5,85	Bom	Confortável
5,86 – 8,2	Regular	Pouco Inconfortável
8,3 – 11	Ruim	Inconfortável
> 11	Péssimo	Extremamente Inconfortável

Os valores da tabela 20 podem ser usados na avaliação de infraestruturas ciclovárias, visando identificar a condição atual que se encontram e a partir daí estabelecer intervenções quando necessárias. Ainda foi plotado um gráfico com as respostas dos ciclistas referentes a aceitabilidade ou não dos trechos e com os valores de IRI, o qual está exposto na figura 41.



**Figura 41** - Aceitabilidade dos trechos em termos de IRI.

De acordo com a figura 41, nota-se que os ciclistas não aceitaram os trechos com valores de IRI maiores ou iguais a 6,74 em quase sua totalidade, sendo que apenas um trecho fugiu deste padrão. Logo, valores de IRI acima de 6,74 podem ser utilizados como gatilho para a realização de intervenções nas infraestruturas ciclovárias.

#### 4.6 Mapas de Conforto e comparação com a ISO 2631-1 (1997)

Foi realizado um estudo de caso na infraestrutura ciclovária da cidade de João Pessoa-PB, visando aplicar as etapas do método da pesquisa e as escalas de conforto que foram definidas referentes aos valores de RMS e IRI.

Para isso, primeiramente foi selecionado um trecho de 700 m de uma ciclovie com pavimento de concreto situada no Bairro José Américo. Este trecho foi dividido em sete

segmentos de 100 m, extensão que foi considerada no método da pesquisa. Com isso, partiu-se para as medidas em campo.

Foram realizadas medidas de irregularidade longitudinal com o equipamento MERLIN e de vibração com o sistema de medição descrito no método, sendo que se utilizou apenas a bicicleta mais rígida e o aplicativo *Accelerometer Analyzer*, pois esses foram selecionados na definição das escalas de conforto.

#### 4.6.1.1 Estudo de caso com valores de IRI

Os valores de IRI obtidos com as medidas realizadas com o MERLIN são apresentados na tabela 21.

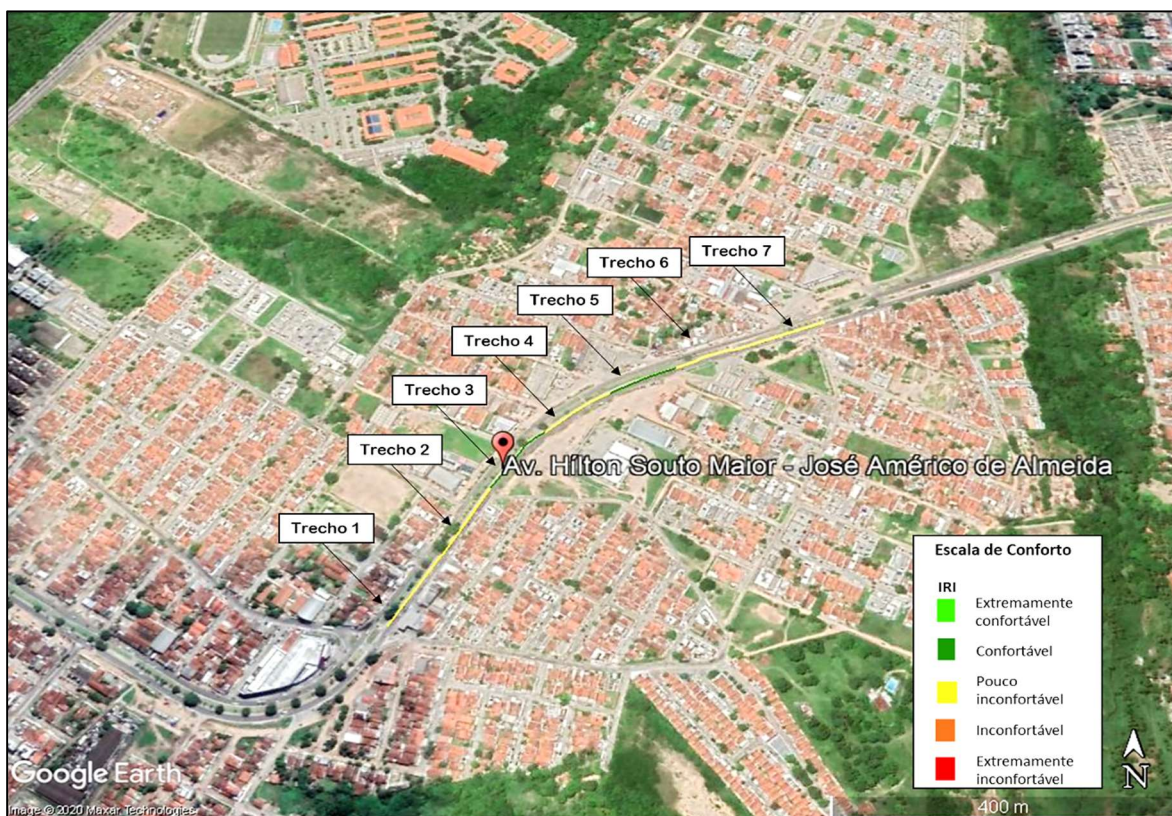
**Tabela 21** – Valores de IRI no estudo de caso.

<b>Infraestrutura ciclovária</b>	<b>IRI (m/km)</b>	<b>Classificação (DNIT, 2006)</b>	<b>Escala de conforto</b>
Trecho 1	7,35	Péssimo	Regular
Trecho 2	6,72	Péssimo	Regular
Trecho 3	5,45	Péssimo	Bom
Trecho 4	6,92	Péssimo	Regular
Trecho 5	5,36	Péssimo	Bom
Trecho 6	6,12	Péssimo	Regular
Trecho 7	5,89	Péssimo	Regular

A tabela 21 apresenta a classificação que os trechos analisados receberiam de acordo com a escala do DNIT (2006), que é usada em rodovias. Nota-se que todos os trechos são classificados como péssimos. Entretanto, considerando a escala definida nesta pesquisa, os trechos 3 e 5 são classificados como “Bom” e o restante como “Regular”. Portanto, existe uma grande diferença entre o que é utilizado em rodovias e o que é percebido pelos ciclistas nas infraestruturas ciclovárias.

Fica claro que no ciclismo são aceitáveis valores de IRI maiores que nas rodovias, isso pode ser explicado pela velocidade de tráfego, a qual é menor nas vias cicláveis, resultando assim em um menor impacto. Contudo, não é recomendável utilizar a classificação do DNIT (2006) em infraestruturas ciclovárias, sendo mais adequada a utilização da escala definida nesta pesquisa.

Visando uma melhor visualização das condições dos trechos em termos de IRI, foi elaborado um mapa com os valores obtidos no estudo de caso e a sua classificação de acordo com a tabela 20. O mapa está apresentado na figura 42.



**Figura 42** - Mapa de conforto em termos de IRI.

Como é possível notar na figura 42, os sete trechos são classificados de acordo com a escala definida nesta pesquisa, cujos trechos “Extremamente confortáveis” recebem a cor verde claro, os “Confortáveis” a cor verde escuro, os “Pouco inconvenientes” a cor amarela, os “Inconvenientes” a cor laranja e os “Extremamente inconvenientes” a cor vermelha. Pode-se observar que dois trechos são confortáveis e o restante são pouco inconvenientes. Esta ferramenta pode ser utilizada pelos planejadores de transporte para identificar a localização dos trechos que necessitam de atenção em relação a sua qualidade.

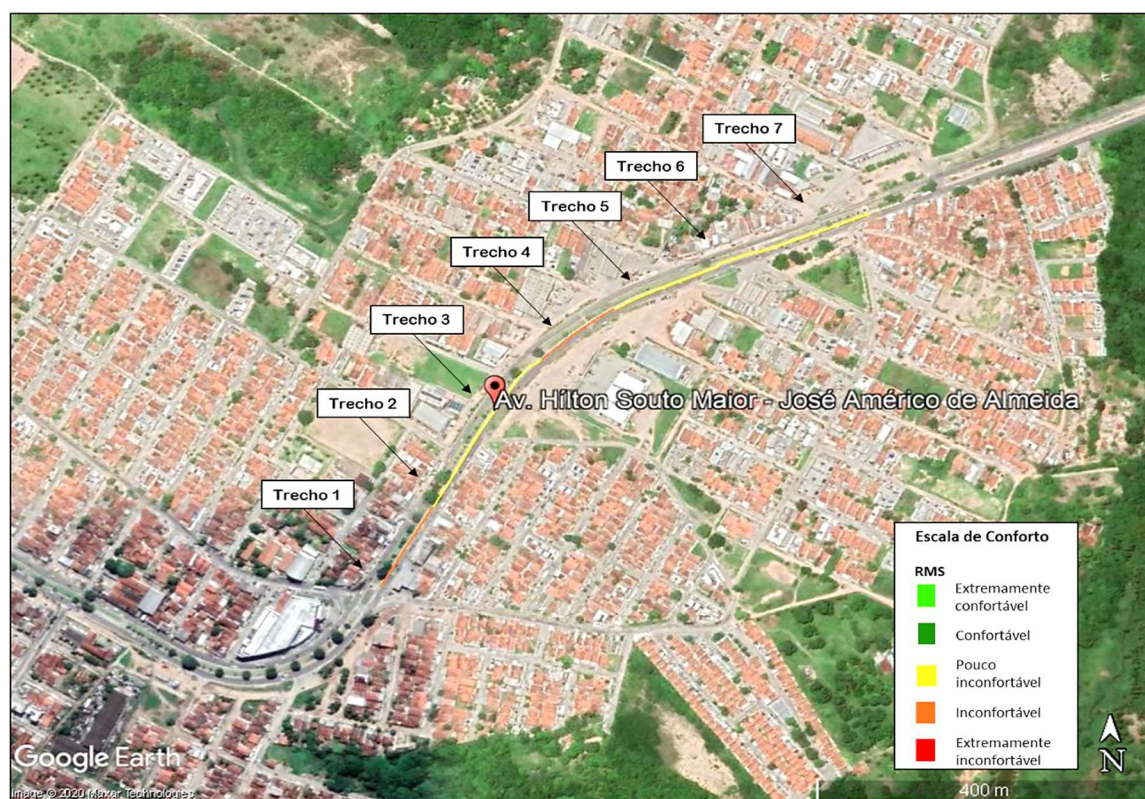
#### 4.6.1.2 Estudo de caso com valores de RMS

A tabela 22 apresenta os valores de RMS obtidos no estudo de caso, os quais representam a vibração sofrida pelo ciclista ao trafegar.

<b>Tabela 22 – Valores de RMS no estudo de caso.</b>	
<b>Infraestrutura cicloviária</b>	<b>RMS (m/s<sup>2</sup>)</b>
Trecho 1	4,32
Trecho 2	3,75
Trecho 3	3,21
Trecho 4	4,10
Trecho 5	3,17
Trecho 6	3,54
Trecho 7	3,36



De posse dos valores de RMS da tabela 22, foi elaborado o mapa de conforto apresentado na figura 43, o qual identifica os trechos e as suas condições segundo a escala de conforto definida nesta pesquisa.



**Figura 43** – Mapa de conforto em termos de RMS.

De acordo com o mapa da figura 43, pode-se observar que os trechos 1 e 4, em laranja, são classificados como desconfortáveis. Já os outros trechos são classificados como pouco desconfortáveis, os quais receberam a cor amarela.

Comparando os mapas da figura 42 e 43, observa-se que classificaram os trechos em condições um pouco diferentes, cujo mapa em termos de RMS se mostrou mais rigoroso. Isso pode ser explicado pelo fato dos valores de RMS dependerem de vários fatores, como: a velocidade desenvolvida na avaliação, a bicicleta, o aplicativo, a fixação do *smartphone* de maneira correta e o ciclista, exigindo assim um maior controle nas suas medições.

Dessa forma, os dados de RMS são mais adequados para avaliações em nível de rede, na qual precisa-se avaliar uma grande extensão da infraestrutura cicloviária, pois possibilitam obter valores confiáveis em um menor tempo, com um menor custo. É válido citar que no estudo de caso levou-se apenas 30 minutos para avaliar a vibração com o *smartphone*, enquanto gastou-se 100 minutos para avaliar a irregularidade longitudinal

com o MERLIN. Entretanto, quando for necessário ter um diagnóstico mais específico do trecho, em nível de projeto, recomenda-se a utilização dos dados de IRI.

#### 4.6.1.3 Comparação com a ISO 2631-1 (1997)

A norma ISO 2631-1 (1997), guia para avaliação da exposição humana às vibrações de corpo inteiro, que é utilizada em diversos setores para avaliar o conforto e os efeitos da vibração na saúde dos indivíduos, traz uma escala de conforto em seu escopo. Tal norma foi desenvolvida para aplicações em atividades em que o indivíduo esteja sentado com a coluna ereta, em pé ou deitado.

Sabendo-se que o ciclista se posiciona na bicicleta de forma diferente das posições abordadas pela norma ISO 2631-1 (1997), decidiu-se analisar se essa norma pode ser utilizada para avaliar o conforto no ciclismo. Para isso, elaborou-se um mapa de conforto com os valores de RMS obtidos no estudo caso e a escala de conforto definida pela norma. O mapa está apresentado na figura 44.



**Figura 44** - Mapa de conforto para a escala da ISO 2631-1 (1997).



De acordo com o mapa da figura 44 é possível notar que a escala da norma ISO classifica todos os trechos como extremamente desconfortáveis, mostrando assim uma grande diferença entre o mapa da figura 43, o qual utilizou a escala definida nesta pesquisa com base na opinião dos ciclistas. Logo, esta norma não é adequada para avaliar o conforto em infraestruturas cicloviárias, pois os ciclistas precisam de vibrações maiores para considerarem o ciclismo desconfortável.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa teve como propósito analisar a viabilidade da inserção de avaliações objetivas, por meio de medidas de irregularidade longitudinal e vibração, para estimar as condições de infraestruturas cicloviárias, propondo uma forma de avaliá-las e uma escala de conforto. Procurou-se utilizar equipamentos simples e de baixo custo, como o *smartphone* para medir a vibração e o equipamento MERLIN para medir a irregularidade.

Verificou-se uma forte correlação entre as medidas de irregularidade, vibração e a avaliação subjetiva, com coeficientes  $R^2$  ajustados em torno de 0,90. Notou-se também que a correlação entre IRI e RMS com a Avaliação Subjetiva é negativa, ou seja, à medida que os valores de irregularidade e vibração sobem, as notas dos ciclistas descem. O mesmo não se repete entre o IRI e o RMS, os quais possuem uma correlação positiva, mostrando que a vibração no ciclismo está intrinsicamente ligada as condições do pavimento, cujos valores altos significam desconforto.

Com as análises de regressão linear foram gerados modelos, em que as variáveis independentes podem retornar valores das variáveis dependentes. Esses modelos tiveram sua consistência comprovada com a aplicação do método da normalidade e da técnica gráfica de resíduos versus valores ajustados. Portanto, valores de IRI, RMS e de Avaliações Subjetivas, seguindo os critérios definidos nesta pesquisa, podem retornar valores entre si com a utilização das equações do modelo.

Por meio de análises estatísticas definiu-se duas escalas de conforto, uma em termos de RMS e outra em termos de IRI. Estas apresentaram valores muito diferentes das já utilizadas em outras situações, que não incluem o ciclismo, como a escala de vibração da norma ISO 2631-1 (1997), desenvolvida para aplicações em atividades em que o indivíduo esteja sentado com a coluna ereta, em pé ou deitado, e a escala de irregularidade do DNIT (2006), utilizada para rodovias.

Visto isso, confirma-se a importância da criação destas escalas para o ciclismo, as quais classificam as condições de conforto de infraestruturas cicloviárias, possibilitando a inserção de avaliações objetivas, que não dependem estritamente da opinião do avaliador, na identificação de pontos críticos que precisam ser recuperados.

Com a definição da escala de conforto em termos de RMS, observou-se que valores até  $1,93 \text{ m/s}^2$  são considerados extremamente confortáveis pelos ciclistas. A partir daí, o conforto começa a diminuir, sendo que valores acima de  $5 \text{ m/s}^2$  são extremamente

inconfortáveis. Observou-se também que a partir de 3,1 m/s<sup>2</sup> os trechos já são inaceitáveis para o tráfego, podendo servir como gatilho para a realização de intervenções nas infraestruturas cicloviárias.

Já na escala de conforto em termos de IRI, observou-se que valores até 4,63 m/km são considerados extremamente confortáveis pelos ciclistas, valor que pode ser utilizado com critério para entrega de obra ou aceitação de serviços, atendendo a um desempenho mínimo especificado. A partir daí, o conforto tende a baixar, cujos valores acima de 11 m/km são extremamente inconfortáveis, correspondendo a um pavimento cicloviário péssimo. No entanto, os ciclistas já consideram inaceitáveis os trechos com IRI acima de 6,74 m/km, cujo pode ser o ponto de partida para realização de intervenções.

O método utilizado se mostrou eficiente, o qual pode ser replicado em qualquer lugar e tem um custo reduzido. Este pode ser aplicado pelos planejadores de transportes ou administradores responsáveis pelas infraestruturas cicloviárias para identificar locais prioritários que necessitam de manutenção, possibilitando um monitoramento constante, auxiliando nas tomadas de decisões e na otimização dos recursos disponíveis. Isso proporcionará melhores condições de conforto e segurança aos ciclistas, podendo incentivar indiretamente o aumento no uso das bicicletas por parte da população, o que trará benefícios sociais, ambientais, fisiológicos e econômicos.

As medidas de irregularidade longitudinal se mostraram viáveis para estimar o conforto em infraestruturas cicloviárias, pois retratam a condição do pavimento onde os ciclistas trafegam. Entretanto, o equipamento MERLIN demanda muito tempo e um grande esforço físico em suas medições. Contudo, os valores de IRI são mais recomendados para levantamentos em nível de projeto, cujo necessita de um diagnóstico mais específico da área.

As medidas de vibração também se mostraram viáveis, mas precisa-se ter um maior controle na sua realização, pois dependem de vários fatores, como: a bicicleta, o *smartphone*, a frequência de aquisição de dados, o aplicativo e as características do ciclista que está conduzindo. Vale salientar que dentre os aplicativos analisados, o *Accelerometer Analyzer* obteve o melhor resultado, e que a bicicleta mais rígida retornou maiores valores de vibração, simulando uma pior condição para o ciclista. Contudo, os valores de RMS são mais recomendados para levantamentos em nível de rede, aqueles em que se necessita avaliar grandes extensões, pois demandam um menor tempo e possuem uma maior produtividade do que o levantamento com o MERLIN.

A utilização da tecnologia de mapeamento no estudo de caso, que aplicou o método e as escalas desenvolvidas na pesquisa, possibilitou uma melhor visualização das condições atuais da infraestrutura cicloviária e se mostrou ser uma ferramenta de grande potencial para a sua gerência, assim como já é utilizada em outros sistemas.

No entanto, estudos futuros podem analisar a influência de outros tipos de bicicletas, *smartphones* e o seu local de instalação, aplicativos, diferentes velocidades, características dos usuários, outro equipamento de medição de irregularidade e a criação de um índice único com base em análises multicritério. Além disso, outros estudos válidos são: identificação dos problemas de saúde causados pelas vibrações e irregularidades excessivas; a diminuição do uso da bicicleta devido às condições ruins da infraestrutura e o impacto na poluição do ar; e a relação entre o custo operacional da bicicleta e a condição do pavimento.

Por fim, conclui-se que é possível inserir essas medidas físicas, de irregularidade e vibração, na avaliação das infraestruturas cicloviárias, as quais conseguem identificar as condições de conforto que os ciclistas estão expostos, e aliadas a tecnologia de mapeamento podem auxiliar na gerência pelos planejadores de transportes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGARWAL, AMIT & ZIEMKE, DOMINIK & NAGEL, KAI. (2019). **Bicycle superhighway: An environmentally sustainable policy for urban transport.** Transportation Research Part A Policy and Practice. 10.1016/j.tra.2019.06.015.
- AMBROŽ, M., (2017). **Raspberry Pi as a low-cost data acquisition system for human powered vehicles.** Measurement 100, 7–18. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.037>.
- ANTP. (2015). **Sistema de Informações da Mobilidade Urbana Relatório Comparativo 2003 - 2013.** Associação Nacional de Transportes Públicos. São Paulo.
- ALESSANDRONI, G.; KLOPFENSTEIN L. C.; DELPRIORI S.; DROMEDARI M.; LUCHETTI G.; PAOLINI B. D.; SERAGHTTI A.; LATTANZI E.; FRESCHI V.; CARDNI A; BOGLIOLI A. (2014) **Smart road sense: Collaborative road surface condition monitoring.** International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies, Ubicomm, pp. 210-215.
- ALMEIDA, LUCAS & OLIVEIRA, FRANCISCO HEBER & RAMOS, SAULO. (2018). **Estudo da condição de superfície em rodovias por meio do uso de aplicativo para smartphone.** Revista Transportes. 26. 10.14295/transportes.v26i2.1406.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM) **Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements.** ASTM E 1926. United States of America — USA, 2008.
- AYACHI, F. S.; DOREY, J.; GUASTAVINO, C. **Identifying factors of bicycle comfort: An online survey with enthusiast cyclists.** Applied Ergonomics, 46, p. 124-136, 2015. doi:10.1016/j.apergo.2014.07.010.
- BARELLA, RODRIGO MALUF. **Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais.** Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. 362 p. São Paulo, 2008.
- BATISTA, D. G. P., & LIMA, E. R. V. (2020). **Índice de avaliação da qualidade de infraestruturas cicloviárias: um estudo em João Pessoa-PB.** urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, 12, e20190086. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.012.e20190086>.

BELZOWSKI B.; EKSTROM A. (2015). **Evaluating Roadway Surface Rating Technologies**. Technical Report. University of Michigan Transportation Research Institute and the Michigan Department of Transportation.

BESTER, C. J. (2003). **The Effect of Road Roughness on Safety**. 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., U.S.A.

BÍL, M., ANDRÁŠIK, R., KUBEČEK, J., (2015). **How comfortable are your cycling tracks? A new method for objective bicycle vibration measurement**. Transport. Res. Part C: Emerg. Technol. 56, 415–425. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.05.007>.

BISCONSINI, Danilo Rinaldi; NÚÑEZ, Javier Yesid Mahecha; NICOLETTI, Rodrigo; FERNANDES JÚNIOR, José Leomar. **Pavement Roughness Evaluation with Smartphones**. International Journal of Science and Engineering Investigations, vol. 7, issue 72, January 2018. Disponível em: <http://www.ijsei.com/papers/ijsei-77218-07.pdf>.

BISCONSINI, D. R. **Avaliação da Irregularidade Longitudinal dos Pavimentos com Dados Coletados por Smartphones**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

BRASIL, **Caderno Referência para a elaboração: Plano de Mobilidade por Bicicleta nas Cidades**. Ministério das Cidades, Caderno 01, p. 232, 1ª ed. Brasília, DF. 2007.

BRASIL. **Estatuto da Cidade**. Lei n. 10.257, de 10 de jul. 2001.

BRASIL. **Lei da Mobilidade Urbana**. Lei n. 12.587, de 03 de jan. 2012.

BRASIL. **Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997**. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Brasília, 1997.

BRIDGELALL, RAJ & HOUGH, JILL & TOLLIVER, DENVER. (2017). **Characterising pavement roughness at non-uniform speeds using connected vehicles**. International Journal of Pavement Engineering. 1-7. 10.1080/10298436.2017.1366768.

CALVEY, J.C., SHACKLETON, J.P., TAYLOR, M.D., LLEWELLYN, R., 2015. **Engineering condition assessment of cycling infrastructure: cyclists' perceptions of satisfaction and comfort**. Transport. Res. Pol. Pract. 78, 134e143.

CAMPOS, VANIA & DE BARROS CARDOSO, PABLO (2016). **Metodologia para planejamento de um sistema ciclovitário**. TRANSPORTES. 24. 39. 10.14295/transportes.v24i4.1158.

CAVIEDES, A. et al. **What does stress real-world cyclists?** Transportation Research Board 96th Annual Meeting, n. January 2017, p. 1–15, 2017.

CÉSAR, YURIÊ BAPTISTA. **Avaliação da ciclabilidade das cidades brasileiras**. 71 f. Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2014.

CHOU, C.-P., LEE, W.-J., CHEN, A.-C., WANG, R.-Z., TSENG, I.C., LEE, C.-C., 2015. **Simulation of bicycle-riding smoothness by bicycle motion analysis model**. J. Transport. Eng. 141 (12), 04015031.

CUNDILL, M. A. **The Merlin low-cost road roughness measuring machine**. Research Report 301. Transport and Road Research Laboratory. Crowthorne: United States, 1991.

CUNDILL, M. A. **The MERLIN Road Roughness Machine: User Guide**. TRL Report 229. London. 1996.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos – 2ª ed.** – Rio de Janeiro: IPR, 2006. 310p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM — DNER. **Metodo do Nivel e Mira para Calibracii de Sistemas Medidores de Irregularidade Tipo Resposta**. DNER-ES 173/86. Ministerio dos Transportes, Espirito Santo, 1986.

DE VET, HENRICA & MOKKINK, LIDWINE & MOSMULLER, DAVID & TERWEE, CAROLINE. (2017). **Spearman-Brown prophecy formula and Cronbach's alpha: Different faces of reliability and opportunities for new applications**. Journal of Clinical Epidemiology. 85. 10.1016/j.jclinepi.2017.01.013.

DOREY, J., GUASTAVINO, C., 2011. **Moving forward: conceptualizing comfort in information sources for enthusiast cyclists**. In: Proceedings of the American Society for Information Science and Technology, New Orleans, LA, vol. 48, pp. 1e9.

DOUANGPHACHANH V, ONEYAMA H, ENGINEERING E. **A study on the use of smartphones under realistic settings to estimate road roughness condition**. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2014, Volume 2014, Number 1, Page 1.

FERNÁNDEZ-HEREDIA, A.; JARA-DÍAZ, S.; MONZÓN, S. **Understanding and modeling bicycle use: the role of perceptions.** Transportation, v. 39, n. 2, p. 409–432, Oct. 2014. DOI: 10.1016/j.tra.2014.02.013

GEIPOT. (2001) **Manual de Planejamento Cicloviário.** Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes, 2001. Brasília.

GILLESPIE, T. D. (1992) **Everything You Always Wanted to Know about the IRI, but Were Afraid to Ask!** In: Road Profiler User Group Meeting. Lincoln.

GILLESPIE, Thomas. (2001). **Everything You Always Wanted to Know about the IRI, But Were Afraid to Ask!.** In: Road Profiler User Group Meeting. Lincoln.

GOMES, H.M., SAVIONEK, D., 2014. **Measurement and evaluation of human exposure to vibration transmitted to hand-arm system during leisure cyclist activity.** Revista Brasileira de Engenharia Biomedica 30 (4), 291e300.

GONG, H & SUN, Y & SHU, X & HUANG, B. (2018). **Use of random forests regression for predicting IRI of asphalt pavements.** Construction and Building Materials. 189. 890-897. 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.017.

GUERREIRO, T. C. M. G. **Mineração de dados, SIG e análise multicritério combinados para o planejamento de redes cicloviárias urbanas.** 2016. 131p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

HANSON, TREVOR & CAMERON, COADY & HILDEBRAND, ERIC. (2014). **Evaluation of low-cost consumer-level mobile phone technology for measuring international roughness index (IRI) values.** Canadian Journal of Civil Engineering. 41. 819-827. 10.1139/cjce-2014-0183.

HENRI, H.C., CHRISTIAANS, M., BREMNER, A., June 1998. **Comfort on bicycles and the validity of a commercial bicycle fitting system.** Appl. Ergon. 29 (3), 201-211.

HERR. B. **High Tech Pavement Measurement Technology Development, Testing and Applications. Pavement Profile Scanners.** Presented in China Road NDT Conference. Phoenix Scientific. 2004.

HEYN, A T; KANIAK, V L; ARANOVICH, LAS. **A Study Of Three Procedures For The Measurement Of Longitudinal Irregularity In Pavements.** TRRL TRANSLATION, Transport and Road Research Laboratory (TRRL), 1989, 4 p. <https://trid.trb.org/view/353123>.



H. KATO, Y. SAKAJYO AND S. KANEDA, "**Visualization Method for Bicycle Rider Behavior Analysis Using a Smartphone**," *2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*, Turin, 2017, pp. 354-359.

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

HOLZEL, C., HOCHTL, F., SENNER, V., 2012. **Cycling comfort on different road surfaces**. *Procedia Engineering* 34, 479e484.

HSU, TIEN-PEN & LIN, Y. (2011). **A model for planning a bicycle network with multi-criteria suitability evaluation using GIS**. *WIT Transactions on Ecology and The Environment*. 243-252. 10.2495/RAV110231.

IBRAHIM M. Asi. (2012). **Pavement Performance Evaluation**. *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 5 N° 2 IV.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION **ISO 2631-1: Mechanical Vibration and shock- Evaluation of human exposure to whole-body vibration- Part 1- General Requirements**. ISO-Standards Cat., 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados – João Pessoa**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pb/joao-pessoa.html>>. Acesso em: 05 de janeiro de 2020

IPEA (2015). **Estimativa dos custos dos acidentes de trânsito no Brasil com base na atualização simplificada das pesquisas anteriores do Ipea**. Disponível em: <[http://www.en.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/160516\\_relatorio\\_estimativas.pdf](http://www.en.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/160516_relatorio_estimativas.pdf)>. Acesso em: 10/09/2019.

ISLAM, SHAHIDUL & G. BUTTLAR, WILLIAM & ALDUNATE, ROBERTO & VAVRIK, WILLIAM. (2015). **Measurement of Pavement Roughness Using Android-Based Smartphone Application**. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2457. 30-38. 10.3141/2457-04.

ITDP – INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE & DESENVOLVIMENTO. **Política de Mobilidade por Bicicletas e Rede Ciclovária da Cidade de São Paulo: Análise e Recomendações**. Novembro, 2015. Disponível em: < <http://itdpbrasil.org.br/wp-content/uploads/2016/03/Relatorio-Ciclovias-SP.pdf> >. Acesso em: 01/08/2019.

JIE, GAO & SHA, AIMIN & HUANG, YUE & HU, LIQUN & TONG, ZHENG & JIANG, WEI (2018). **Evaluating the cycling comfort on urban roads based on cyclists' perception of vibration.** Journal of Cleaner Production. 192. 10.1016/j.jclepro.2018.04.275.

JOO, SHINHYE & OH, CHEOL & JEONG, EUNBI & LEE, GUNWOO. (2015). **Categorizing bicycling environments using GPS-based public bicycle speed data.** Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 56. 10.1016/j.trc.2015.04.012.

KAMARGIANNI, M. **Designing Sustainable Cities based on Next eneration's Cycling Ridership Demand.** Transportation Research Board 94th Annual Meeting Compendium of Papers. Washington D. C., 2015.

KEARNS, MICHELLE & LEDSHAM, TRUDY & SAVAN, BETH & SCOTT, JAMES. (2019). **Increasing cycling for transportation through mentorship programs.** Transportation Research Part A: Policy and Practice. 128. 34-45. 10.1016/j.tra.2019.07.014.

KIRNER, J. P. **Proposta de um método para a definição de rotas cicláveis em áreas urbanas.** 228p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Centro de Ciências Exatas, Universidade Federal de São Carlos. 2006.

KIRNER, J. & SANCHES, S. P. (2008). **Method for Establishing Urban Cycling Routes: An Application in São Carlos, Brazil.** In: Transportation Research Board 87th Annual Meeting, Washington D. C., USA. <http://pubsindex.trb.org/orderform.html>.

LAGE, Luciana de Assis. **Novos desafios para a mobilidade urbana sustentável: o estudo de caso do uso da bicicleta em Belo Horizonte.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e urbanismo) - UFMG, Belo Horizonte, 2017.

L.M. ROSEIRO, M.A. NETO, A.M. AMARO, C.J. ALCOBIA, M.F. PAULINO, **Hand-arm and whole-body vibrations induced in cross motorcycle and bicycle drivers,** International Journal of Industrial Ergonomics, Volume 56, 2016, Pages 150-160, ISSN 0169-8141, <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.10.008>.

MACDERMID, PAUL & FINK, PHILIP & STANNARD, STEPHEN. (2014). **Transference of 3D accelerations during cross country mountain biking.** Journal of Biomechanics. 47. 10.1016/j.jbiomech.2014.03.024.

MAGALHÃES, J. R. L., CAMPOS, V.B.G., BANDEIRA, R.A.M. (2015). **Metodologia para identificação de redes de rotas cicláveis em áreas urbanas.** Journal of Transport Literature, Vol.9 no3. DOI: 10.1590/2238-1031.jtl.v9n3a7.

MARTINS, MARCEL & RODRIGUES DA SILVA, ANTÔNIO NÉLSON. (2019). **Estudo hipotético para avaliação preliminar da resiliência na mobilidade urbana.** Ambiente Construído. 19. 209-219. 10.1590/s1678-86212019000100302.

MEYER, DANIEL & KLOSS, GIDEON & SENNER, VEIT. (2016). **What is Slowing Me Down? Estimation of Rolling Resistances During Cycling.** Procedia Engineering. 147. 526-531. 10.1016/j.proeng.2016.06.232.

MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2007. **Programa Brasileiro de Mobilidade por Bicicleta – Bicicleta Brasil. Caderno de referência para elaboração de Plano de Mobilidade por Bicicleta nas Cidades.** Brasília.

MONARI, M. **Método para definição de rede de rotas cicláveis em áreas urbanas de cidades de pequeno porte: um estudo de caso para a cidade de Bariri-SP.** 206 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2018.

MORAIS, M. P.; CARVALHO, C. H.; REGO, P. A. (2012) **Condições de moradia, saneamento básico e mobilidade urbana no Brasil: evidências a partir da PNAD 2009.** In: CASTRO, J. A; ARAÚJO, H. E. (org.) Situação social brasileira: monitoramento das condições de vida 2. Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas; 2012, Cap. 8, p.139 - 59.

MORROW, G.; FRANCIS, A.; COSTELLO, S. B.; DUNN, R. C. M. (2006) **Comparison of Roughness Calibration Equipment - with a View to Increased Confidence in Network Level Data.** Institute of Transportation Engineers Annual Meeting and Exhibit 2005, Victoria, Australia, 7-10 August. v. 1, pp. 843-856, isbn: 9781622761869.

MULITERNO, BETINA KNEBEL; JUNIOR, FERNANDO MULITERNO; PRAVIA, ZACARIAS MATIN CHAMBERLAIN. (2019). **Avaliação da irregularidade longitudinal do pavimento sobre pontes usando acelerações medidas por *smartphones*.** TRANSPORTES. DOI:10.14295/transportes. v27i2.1686.

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

NUÑEZ, J. Y. M. **Estresse fisiológico dos ciclistas e planejamento e avaliação de redes cicloviárias.** 2018. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de Sao Carlos da Universidade de Sao Paulo, 2018.

NUÑEZ, JAVIER YESID & BISCONSINI, DANILO & RODRIGUES DA SILVA, ANTÔNIO NÉLSON (2018). **Combining environmental quality assessment of bicycle infrastructures with vertical acceleration measurements**. Transportation Research Part A General. 10.1016/j.tra.2018.10.032.

OJIMA, R.; MARANDOLA JUNIOR, E. **Dispersão urbana e mobilidade populacional: implicações para o planejamento urbano e regional** [livro eletrônico] – São Paulo: Blucher, 2016.

OLIEMAN, M., MARIN-PERIANU, R., MARIN-PERIANU, M., 2012. **Measurement of dynamic comfort in cycling using wireless acceleration sensors**. Procedia Engineering 34, 568e573.

PAÉZ, E. M. A. **Índice de Condição do Pavimento (ICP) para Aplicação em Sistemas de Gerência de Pavimentos Urbanos**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

PARKIN, JOHN & ROTHERAM, JONATHON. (2010). **Design speeds and acceleration characteristics of bicycle traffic for use in planning, design and appraisal**. Transport Policy. 17. 335-341. 10.1016/j.tranpol.2010.03.001.

PELLAND-LEBLANC, JEAN-PHILIPPE & LÉPINE, JULIEN & CHAMPOUX, YVAN & DROUET, JEAN-MARC. (2014). **Using Power as a Metric to Quantify Vibration Transmitted to the Cyclist**. Procedia Engineering. 72. 392-397. 10.1016/j.proeng.2014.06.067.

PETRONE, N., GIUBILATO, F., 2013. **Development of a test method for the comparative analysis of bicycle saddle vibration transmissibility**. Procedia Engineering 60, 288 e 293.

PRASHANT M. PATIL; DR. SACHIN K. PATIL. (2018). **Review on Maintenance of Roads based on Pavement Condition Index**. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). e-ISSN: 2395-0056. Volume: 05 Issue: 07.

PROVIDELO, JANICE & SANCHES, SUELY. (2010). **Percepções de indivíduos acerca do uso da bicicleta como modo de transporte**. TRANSPORTES. 18. 10.14295/transportes.v18i2.424.

PROVIDELO, J. K. & SANCHES, S. P. (2011). **Roadway and traffic characteristics for bicycling**. Transportation, 38(5), 765-777. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11116-011-9353-x>.

PUCHER, J.; BUEHLER, R. **Making cycling irresistible: Lessons from the Netherlands, Denmark and Germany.** Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal, 28(4), p. 495-528, 2007.

PUCHER, J.; DILL, J.; HANDY, S. **Infrastructure, programs and policies to increase bicycling:** An International review. Preventive Medicine, n. 50, p. 106-125, 2009.

RAHUL, T M & VERMA, ASHISH. (2013). **Economic impact of non-motorized transportation in Indian cities.** Research in Transportation Economics. 38. 22-34. 10.1016/j.retrec.2012.05.005.

RAMOS, S. P. **Análise da viabilidade técnica dos levantamentos de baixo custo de perfil e irregularidade longitudinal de pavimento com o uso de acelerômetros controlados por arduino auxiliado por bicicleta.** 2017. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

ROBBINS, T., 2016. **A synthesis report: value of pavement smoothness and ride quality to roadway users and the impact of pavement roughness on vehicle operating costs.** 16-03.

RODRIGUES DA SILVA, A. N.; RIBEIRO, A. S. N.; PINHEIRO, E. A.; CORREIA, G. H. A. R.; GUERREIRO, T. C. M.; CRUZ, I.; FRADE, I.; CAMPOS, V. B. G. (2012) Viagens por bicicletas. In: PORTUGAL, L.S. (Org.). **Polos geradores de viagens orientados à qualidade de vida e ambiental: Modelos e taxas de geração de viagens.** 1ª ed. Interciência, Cap. 15, p. 497 - 529.

SAYERS, M. W. E S. M. KARAMIHAS (1998) **The little book of profiling.** Ann Arbor: Transportation Research Institute, University of Michigan, USA.

SAYERS, MICHAEL W; GILLESPIE, THOMAS D; QUEIROZ, CESAR A.V. 1986. **The International Road Roughness Experiment (IRRE) : establishing correlation and a calibration standard for measurements (English).** World Bank technical paper ; no. WTP 45. Washington, DC : The World Bank.

SEGADILHA, A.B.P., SANCHES, S.DA.P. (2014). **Analysis of bicycle commuter routes using GPS and GIS.** Procedia – Social Behav. Sci. 162, 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.12.200>.

SEGADILHA, ANA BEATRIZ PEREIRA. **Identificação dos fatores que influenciam na escolha da rota pelos ciclistas: estudo de caso da cidade de São Carlos.** 79 f. Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2014.

SFDPH (2009). **Bicycle Environmental Quality Index (BEQI)**. Draft Report. San Francisco Department of Public Health, Environmental Health Section/Program on Health, Equity and Sustainability, San Francisco, CA United States Draft Report.

SHAFIZADEH, K.R., MANNERING, F.L., e PIERCE, L.M,. **A statistical analysis of factors associated with driver-perceived road roughness on urban highways**. Research Report WARD538.1. Washington State Transportation Center, University of Washington, Seattle, WA. 2002.

SILVA, G. J. A. da; ROMERO, M. A. B. Cidades sustentáveis: uma nova condição urbana a partir de estudos aplicados a Cuiabá, capital do estado de Mato Grosso, Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 3, p. 253-266, jul./set. 2013.

SLATER, K., 1985. **Human Comfort**. C.C.Thomas, Springfield, IL.

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

TAKAHASHI, JUNJI & KOBANA, YUSUKE & ISOYAMA, NAOYA & TOBE, YOSHITO & LOPEZ, GUILLAUME. (2018). **YKOB: Participatory Sensing-Based Road Condition Monitoring Using Smartphones Worn by Cyclist**. Electronics and Communications in Japan. 10.1002/ecj.12027.

THIGPEN, C., LI, H., HARVEY, J., 2015. **Modeling the impact of pavement roughness on bicycle ride quality** (15-3542). January 11-15, 2015. In: Paper Presented at the Transportation Research Board 94th Annual Meeting, Washington, D.C.

TORBIC, D., EL-GINDY, M., ELEFTERIADOU, L., 2003. **Methodology for quantifying whole-body vibration experienced by bicyclists**. Int. J. Veh. Des. 4, 452–480.

TOO, D., Nov 1990. **Biomechanics of cycling and factors affecting performance**. SportMed. 10 (5), 286-302.

TUCKER, B.; MANAUGH, K. **Whose bike lanes? Access to safe Cycling routes across neighborhoods in Rio de Janeiro and Curitiba**. Transportation Research Board 95th Annual Meeting Compendium of Papers. Washington D. C., 2016.

UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS. Population Division (2018). **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision**, Online Edition.

VANWALLEGHEM, JOACHIM & MORTIER, FREDERIK & DE BAERE, IVES & LOCCUFIER, MIA & VAN PAEPEGEM, WIM. (2012). **Design of an instrumented bicycle for the evaluation of bicycle dynamics and its relation with the cyclist's comfort**. Procedia Engineering. 34. 485–490. 10.1016/j.proeng.2012.04.083.

WALEED ALEADELAT; KHALED KSAIBAT; CAMERON H. G. WRIGHT; PROMOTHEES SAHA. (2018) **Evaluation of Pavement Roughness Using an Android-Based Smartphone**. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 04018033, 144, 3. DOI: 10.1061/JPEODX.0000058.

WU, R., LOUW, S., LI, H., THIGPEN, C., HARVEY, J., 2015. **Bicycle vibration and pavement ride quality for cyclists (15-4672)**. January 11-15, 2015. In: Paper Presented at the Transportation Research Board 94th Annual Meeting, Washington, D.C..

ZENG, HUANGHUI & PARK, HYUNGJUN & SMITH, BRIAN & PARKANY, EMILY. (2017). **Feasibility Assessment of a Smartphone-Based Application to Estimate Road Roughness**. KSCE Journal of Civil Engineering. 22. 10.1007/s12205-017-1008-9.

ZHANG, L., ZHANG, J., DUAN, Z.-Y., BRYDE, D. (2015). **Sustainable bike-sharing systems: characteristics and commonalities across cases in urban China**. J. Clean. Prod. 97, 124-133.