

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

KATIA ELOIZA DA ROCHA

**AVALIAÇÃO DO CONFORTO VIBRACIONAL DE PASSAGEIROS DE ÔNIBUS E
DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS COM DADOS DE
SMARTPHONES**

**PATO BRANCO
2023**

KATIA ELOIZA DA ROCHA

**AVALIAÇÃO DO CONFORTO VIBRACIONAL DE PASSAGEIROS DE ÔNIBUS E
DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS COM DADOS DE
SMARTPHONES**

**Evaluation of vibration Comfort of bus passengers and longitudinal
irregularities of pavements using data collected by smartphones**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharelem Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Danilo Rinaldi Bisconsini

**PATO BRANCO
2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

KATIA ELOIZA DA ROCHA

**AVALIAÇÃO DO CONFORTO VIBRACIONAL DE PASSAGEIROS DE ÔNIBUS E
DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS COM DADOS DE
SMARTPHONES**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 20 de junho de 2023

Orientador: Profº Dr. Danilo Rinaldi Bisconsini
Doutorado em Engenharia de Transportes – USP
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco

Membro da banca: Profº Dr. Deividi da Silva Pereira
Doutorado em Engenharia de Transportes
Universidade Federal de Santa Maria

Membro da banca: Profº Dr. Luciano Pivoto Specht
Doutorado em Geotecnia
Universidade Federal de Santa Maria

**PATO BRANCO
2023**

DEDICATÓRIA

Aos meus pais que não mediram esforços para que eu me tornasse Engenheira e nunca desistiram dos nossos sonhos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por guiar meus passos na caminhada mais importante da minha vida.

Ao meu pai, Vilmar da Rocha, por nunca ter me deixado desistir e sempre me encorajou a seguir em frente.

À minha mãe, Eva da Rocha por todo carinho, amor, paciência, zelo e compreensão.

Ao meu irmão, Cleiton Henrique da Rocha por todo auxílio e amparo nesses longos anos.

À minha amiga Maria Luiza Medeiros de Freitas por todos os momentos, bons e não tão bons, de nossas vidas durante nossa trajetória acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Danilo Rinaldi Bisconsini, não só nesta pesquisa, mas em toda a minha caminhada acadêmica. Agradeço por todos os ensinamentos, paciência e dedicação.

Ao Igo Monteiro Brasil, por me ensinar a utilizar o web site Roadify, enquanto ainda estava em fases de testes e aperfeiçoamento.

A todos que de alguma forma, contribuíram para a minha formação.

RESUMO

As rodovias podem ser avaliadas de acordo com a qualidade de rolamento que proporcionam aos usuários. Essa condição é caracterizada principalmente pela irregularidade longitudinal de pavimentos, que podem gerar desconforto e insegurança aos usuários, além de aumentar os Custos Operacionais dos Veículos (COV). Nos últimos anos, diversos pesquisadores têm investigado o uso de smartphones para a coleta de dados relacionados ao conforto de usuários de sistemas de transportes e informações úteis a Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGP), devido a sua praticidade e baixo custo. Neste estudo, realizou-se uma análise das vibrações causadas em passageiros de ônibus por meio de dados de smartphones na cidade de Santa Maria (RS). Foram coletadas acelerações em três diferentes posições dentro de diferentes ônibus (eixo dianteiro, eixo traseiro e balanço do ônibus) para análise do conforto dos usuários, com base na norma ISO 2631-1, que trata da análise de Vibrações de Corpo Inteiro (VCI). Também foram gerados modelos de regressão linear entre as acelerações fornecidas pelos smartphones e a irregularidade longitudinal dos pavimentos existentes no percurso do ônibus, por meio de dados de índice de Irregularidade Internacional (IRI) obtidos por um perfilômetro inercial a laser. Os resultados obtidos revelaram uma diferença significativa entre as vibrações geradas em posições diferentes, sendo o balanço a posição com vibrações de maior amplitude, enquanto o eixo dianteiro foi considerado o mais confortável. Em relação aos modelos de regressão obtidos, considera-se que as acelerações medidas por smartphones embarcados em ônibus não configuram uma variável relevante para a predição do IRI.

Palavras-chave: pavimentos; ônibus; IRI; conforto.

ABSTRACT

Highways can be evaluated according to the quality of road they provide to users. This condition is mainly characterized by the longitudinal irregularity of pavements, which can cause discomfort and insecurity for users, in addition to increasing Vehicle Operating Costs (VOC). In recent years, several researchers have investigated the use of smartphones to collect data related to the comfort of users of transport systems and useful information for Pavement Management Systems (SGP), due to its practicality and low cost. In this study, an analysis of the vibrations caused in bus passengers was carried out using data from smartphones in the city of Santa Maria (RS). Accelerations were collected in three different positions inside different buses (front axle, rear axle and bus overhang) to analyze the comfort of users, based on the ISO 2631-1 standard, which deals with the analysis of Whole Body Vibrations (WBV). Linear regression models were also generated between the accelerations provided by smartphones and the longitudinal unevenness of existing pavements along the bus route, using International Irregularity Index (IRI) data obtained by an inertial laser profilometer. The results obtained revealed a significant difference between the vibrations generated in different positions, the balance being the position with the highest amplitude vibrations, while the front axle was considered the most comfortable. Regarding the regression models obtained, it is considered that the accelerations measured by smartphones on board buses are not a relevant variable for predicting the IRI.

Keywords: pavements; bus; IRI; comfort.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: níveis de serventia	17
Figura 2: perfilômetro utilizado na pesquisa	18
Figura 3: modelo quarto de carro e gráfico de resposta da suspensão em diferentes frequências	19
Figura 4: aplicativo UTFPR-PB-USP: tela inicial (a); tela de medição (b).....	24
Figura 5: fases de processamento do Roadify: (a) inserir dados; (b) divisão dos trechos; (c) processamento dos dados; (d) análise estatística dos dados; (e) mapa de rodovias	27
Figura 6: localização dos pontos e configuração do ônibus	28
Figura 7: suporte utilizado.....	29
Figura 8: trechos divididos a cada 100 metros.....	30
Figura 9: classificação em cada ponto analisado: (a) balanço; (b) dianteiro; (c) traseiro	36
Figura 10: legenda de classificação dos trechos	38
Figura 11: mapa de rodovias para o trecho 1 ida: (a) balanço; (b) eixo dianteiro; (c) eixo traseiro.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: média do R^2 ajustado.....	27
Tabela 2: número de viagens consideradas	29
Tabela 3: classificação do IRI.....	30
Tabela 4: classificação para acelerações verticais baseada na ISO 2631-1 (1997) e adaptada por Bisconsini et al. (2021).....	31
Tabela 5: estatísticas descritivas.....	33
Tabela 6: estatísticas descritivas: IRI.....	34
Tabela 7: classificação	35
Tabela 8: resumo de variância	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Objetivo geral.....	11
1.1.2	Objetivos específicos.....	11
1.2	Justificativa	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Importância do Transporte Público Coletivo	13
2.2	Fatores que afetam o Uso e a Escolha pelo Transporte Público Coletivo	14
2.3	Conforto Vibracional e Procedimentos para sua Avaliação	16
2.4	Equação do IRI e RMSVA	19
2.5	Smartphones	21
3	METODOLOGIA	23
3.1	Classificação Metodológica da Pesquisa	23
3.2	Aplicativo UTFPR-PB-USP	23
3.3	Aplicativo Roadify	24
3.4	Filtros	27
3.5	Análise do conforto vibracional de usuários	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1	Velocidade	32
4.2	Estatísticas Descritivas	32
4.3	Classificação das acelerações e IRI	34
4.4	Modelos de Regressão	36
4.5	Mapa de rodovias	38
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

O transporte é definido como o deslocamento de pessoas e mercadorias de um local para outro, e está atrelado ao desenvolvimento da humanidade. As sociedades dependem dos transportes, seja de forma direta ou indireta (VOLPATTO *et al.*, 2019).

Os pavimentos têm a função de garantir a trafegabilidade em qualquer estação do ano, proporcionando conforto e segurança aos usuários (BERNUCCI *et al.*, 2008). As características de conforto são um dos critérios mais importantes para se medir a 'qualidade' de um veículo exposto a diferentes tipos de vibrações (MAIA, 2002).

As rodovias podem ser avaliadas de acordo com a qualidade de rolamento que proporcionam aos usuários. Essa condição é caracterizada principalmente pela irregularidade longitudinal de pavimentos, definida como distorções na superfície do pavimento em relação a um plano de referência, causando vibrações nos veículos que provocam desconforto, insegurança, devido à perda de estabilidade do veículo, e prejuízo à drenagem superficial do pavimento, além de aumentar os Custos Operacionais dos Veículos (COV) (BUTTLAR E ISLAM, 2012).

A irregularidade longitudinal de pavimentos pode ser avaliada a partir de diferentes sistemas de medição como por medidas topográficas ou com equipamentos medidores do perfil longitudinal, com ou sem contato com a superfície, ou ainda indiretamente por equipamentos do tipo 'resposta', que fornecem um somatório de desvios do eixo de um veículo em relação à suspensão (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Nas últimas duas décadas, diversos pesquisadores abordaram a possibilidade de uso de smartphones para a avaliação de pavimentos, principalmente devido ao avanço tecnológico desses dispositivos, que incluem diversos sensores, como acelerômetros, giroscópios, magnetômetros, gravadores de voz, GPS (Sistema de Posicionamento Global) etc., possibilitando o desenvolvimento de aplicativos úteis à geração de dados que podem ser utilizados para a alimentação de Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGP) a um baixo custo.

Utilizar smartphones para avaliar a irregularidade longitudinal de pavimentos é uma alternativa econômica e tecnicamente viável, pois é de fácil acesso à maioria dos usuários. Para a avaliação vibracional, Chaves *et al.* (2020) escolheram um trecho de 1,5 km da rodovia BR-122, que apresentava pista simples e pavimentação em revestimento asfáltico. O smartphone foi fixado no veículo por meio de um suporte do

tipo para-brisa. Foram utilizados dois aplicativos para a coleta de dados, o SmartIRI e RoadLab. O SmartIRI, sendo um aplicativo nacional, apresentou vantagem em relação ao RoadLab no que se refere à simplicidade e objetividade de sua operação, além de não ter ocorrido falhas durante seu uso, mensurando todo o trecho especificado. Já o aplicativo RoadLab apresentou algumas falhas durante o seu uso, deixando de mensurar algumas partes do trecho.

Barabino *et al.* (2019) propuseram avaliar o conforto de passageiros dentro de um ônibus em Cagliari, cidade costeira do sul da Itália. A pesquisa consistiu em avaliar o conforto dos passageiros com uso de aplicativos para smartphones e com a aplicação de questionários distribuídos aleatoriamente para os passageiros, usando um método que alia parâmetros cinemáticos com a avaliação dos usuários. Concluíram que a aplicação de questionários possibilita identificar onde os passageiros experimentam maiores condições de conforto e desconforto, e que este desconforto está associado ao modo de condução dos motoristas.

Sendo assim, é importante investigar métodos para avaliar a qualidade do transporte coletivo do ponto de vista do conforto vibracional, analisando as vibrações geradas durante o trajeto dos ônibus e como determinadas variáveis influenciam nessas vibrações. Nesta pesquisa, tem-se como propósito avaliar se dados coletados por smartphones dentro de ônibus podem ser úteis para avaliar o conforto vibracional de usuários e estimar trechos de pavimentos com condições críticas de rolamento em relação à irregularidade longitudinal.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar o potencial de uso de smartphones para a avaliação do conforto vibracional de passageiros de ônibus.

1.1.2 Objetivos específicos

- Averiguar se os sensores dos smartphones são adequados para mensurar vibrações geradas em passageiros;

- Avaliar se dados de smartphones embarcados em ônibus podem ser úteis para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos.

1.2 Justificativa

O transporte público é um dos principais meios de locomoção da sociedade, possibilitando um menor tráfego de automóveis e diminuindo a emissão de gases poluentes. De acordo com a Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU, 2022), 28% das viagens são feitas por transporte coletivo e 85,7% das viagens de transporte coletivo são realizadas por ônibus.

Para aumentar a atratividade do transporte público por ônibus, é necessário garantir a qualidade do deslocamento. Dentre os aspectos relacionados com a qualidade da viagem está o conforto vibracional. Um dos principais fatores associados às vibrações geradas em passageiros de ônibus é a irregularidade longitudinal de pavimentos.

Um tema original é aquele que tem o potencial de surpreender (CASTRO, 1977). A originalidade desta pesquisa está baseada na análise da correlação entre os dados coletados por smartphones embarcados em ônibus e dados obtidos por um perfilômetro inercial a laser, assim como no método definido para obtenção de tais dados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura referente aos seguintes tópicos: importância do transporte público coletivo, fatores que influenciam na escolha do modo de transporte, conforto vibracional e procedimentos para sua avaliação, equação do IRI e RMSVA e smartphones.

2.1 Importância do Transporte Público Coletivo

Com o grande número de passageiros que o transporte público coletivo é responsável diariamente, se tornou um modo muito importante para o desenvolvimento das cidades, pois garante a locomoção de inúmeras pessoas. Sendo assim, o sistema deve garantir qualidade e acessibilidade mínimas para transportar seus passageiros.

A mobilidade urbana e o transporte coletivo estão diretamente ligados. A mobilidade urbana está associada ao deslocamento de pessoas e bens dentro do espaço das cidades, mediante utilização de veículos, de vias públicas e da infraestrutura disponível (TCU, 2010).

A maior parte das cidades sofrem com a mobilidade urbana devido ao crescimento territorial desordenado e dos sistemas de transportes, fazendo com que o uso de automóveis motorizados aumente significativamente. Com o aumento de automóveis nas ruas, aumentam também os congestionamentos, os incidentes e acidentes de trânsito, emissão de poluentes e ruídos. Por isso, os planos de mobilidade são tão importantes, pois investem em meios de transporte ativos e coletivos. Incentivar o uso do transporte coletivo é fundamental quando se trata de planos de mobilidade, uma vez que garante o deslocamento de muitas pessoas em um menor espaço, fazendo com que o número de veículos nas vias diminua (TCU,2010).

Para que o transporte público seja eficaz, satisfazendo as demandas da população, é necessário que o número de ônibus seja suficiente, mesmo fora dos horários de pico, e com linhas mais abrangentes, sem a necessidade de transbordo, diminuindo o tempo de espera em terminais. Também é importante que os preços das passagens sejam acessíveis e com valor justo, e que cada vez mais sejam

implementados programas municipais e estaduais para abono de tarifas para usuários de classes menos favorecidas que utilizam esse meio de transporte diariamente.

Os ônibus também precisam apresentar segurança e conforto aos usuários, sendo estes fatores importantes para a atividade deste modo de transporte. A segurança envolve dois tipos de risco de naturezas distintas: o risco de acidentes de trânsito e o risco de furtos e roubos. Em relação ao conforto, este envolve diferentes aspectos, como temperatura, ventilação, espaço interno e vibrações sentidas durante a viagem.

2.2 Fatores que afetam o Uso e a Escolha pelo Transporte Público Coletivo

De acordo com Rabay *et al.* (2017), os principais fatores que afetam a escolha pelo transporte coletivo são: valor da tarifa, qualidade do serviço, renda e a propriedade do automóvel.

Diversos fatores interferem na escolha do transporte público, sendo a tarifa uma das variáveis mais importantes, por se tratar de uma mudança relativamente fácil de identificar e frequentemente reajustada (Balcombe *et al.*, 2004). Em relação à qualidade do serviço, são citados o tempo de acesso e saída, intervalos de serviço, tempo no veículo, transbordo, entre outros (RABAY *et al.*, 2017).

Outro fator relevante na escolha do transporte coletivo é a densidade demográfica (BALCOMBE *et al.*, 2014). A tendência é que locais com maior número populacional apresentem também maior número de passageiros de baixa renda e, conseqüentemente, menor propriedade de veículos, aumentando a demanda por transporte público coletivo.

A qualidade no transporte público deve ser garantida por todos os envolvidos com esse sistema, direta ou indiretamente. Governo, usuários, trabalhadores do setor, empresários do ramo e comunidade são atores citados como responsáveis e que devem ter seus objetivos bem definidos. O governo tem o propósito de fornecer segurança, comodidade e rapidez com um custo compatível com a renda dos usuários. Já o objetivo dos usuários e também é um direito: ter qualidade no transporte, a um baixo custo. Para os trabalhadores do setor, os objetivos que, também representam direitos, são de uma jornada de trabalho adequada e remuneração justa com a função exercida. Os empresários do setor têm o objetivo e o direito de ter seu retorno econômico sobre o investimento feito. A comunidade tem

o objetivo de diminuir a poluição atmosférica, sonora e visual, e zelando pelos terminais e espaços públicos (FERRAZ E TORRES, 2004).

Ferraz e Torres (2004) também citam doze fatores que influenciam na qualidade do transporte para os usuários:

- **Acessibilidade:** está associada à facilidade de chegar e sair do local de embarque e desembarque e finalizar a viagem.
- **Frequência de atendimento:** está relacionada com o tempo de espera entre a passagem dos ônibus, o que afeta diretamente o tempo de espera.
- **Tempo de viagem:** relaciona-se com o tempo que o usuário permanece dentro do meio de transporte, que depende da distância percorrida e da velocidade média.
- **Confiabilidade:** associa-se com o grau de certeza de que o ônibus passará no horário previsto e chegará ao destino, com uma margem de tolerância.
- **Segurança:** compreende os acidentes envolvendo o ônibus e os atos de violência que podem acontecer no interior do veículo.
- **Características dos veículos:** diz sobre a conservação do veículo e as tecnologias nele inseridas.
- **Características dos locais de parada:** relacionado à sinalização adequada na hora do desembarque, calçadas amplas que comportem a necessidade dos usuários e bancos para que possam se sentar enquanto aguardam.
- **Sistema de informações:** envolve a distribuição de folhetos com os horários dos itinerários, com o ponto de partida inicial e final.
- **Conectividade:** facilidade de se deslocar por locais da cidade sem precisar de transbordo.
- **Comportamento dos operadores:** habilidade do motorista em conduzir o veículo com cuidado e competência, tratar os passageiros com respeito e esperar que o usuário finalize o embarque e desembarque antes de fechar as portas.

- Estado das vias: garantir a qualidade da via para que não haja, com frequência, diminuição e aumento da velocidade, devido aos buracos da via. Também é importante que as vias sejam bem sinalizadas.

A qualidade do transporte público coletivo está também associada ao conforto em relação às vibrações que os usuários estão expostos em todas as viagens. A irregularidade longitudinal é o parâmetro mais crítico considerado pelos usuários, em relação ao conforto e à serventia da via (Gong *et al.*, 2018). Logo, assegurar um nível razoável de suavidade do pavimento permite que os usuários conduzam com conforto e segurança. Entretanto, isso requer monitoramento constante e a adoção de estratégias de manutenção adequadas quando necessário (NETO, 2020).

2.3 Conforto Vibracional e Procedimentos para sua Avaliação

O conforto é definido como um estado de bem-estar em condições ótimas, sendo diferente de uma pessoa para outra e dependente da situação (NETO, 2020). Slater (1985), cita que o conforto é um estado de harmonia entre o homem e o ambiente em três dimensões: fisiológica, psicológica e física.

Em uma viagem, o conforto depende da qualidade de rolamento das vias. Nesse sentido, a irregularidade longitudinal é uma característica importante do pavimento, pois afeta não apenas a qualidade do passeio, mas também os custos de atraso do veículo, consumo de combustível e custos de manutenção (DOUANGPHACHANH e ONEYAMA, 2013).

O conceito de serventia de um pavimento foi desenvolvido por Carey e Irick na década de 1960, sendo definida como “capacidade de um pavimento em servir aos usuários da rodovia” (BARELLA, 2008).

Domingues (2006) define a irregularidade dos pavimentos como o conjunto de desvios de sua superfície, ao longo das trilhas de rodas, em relação à superfície ideal projetada, com características tais que afetam o movimento dos veículos, a qualidade do rolamento, as cargas dinâmicas que atuam sobre a via e a drenagem da superfície.

A avaliação funcional de um pavimento está relacionada ao entendimento da condição da superfície e como esta condição afeta o conforto de condução. Nesse sentido, dois parâmetros de avaliação são muito utilizados: o Valor de Serventia Atual (VSA) e o Índice Internacional de Irregularidade (IRI).

A norma do DNIT 009/2003 – PRO descreve o VSA como, uma medida subjetiva obtida através de um grupo de avaliadores que julgam as condições da superfície de um pavimento. As notas dadas pelo grupo, formado por cinco pessoas, variam de 0 a 5 e os conceitos associados às faixas de serventia são mostrados na Figura 1.

Padrão de conforto ao rolamento	Avaliação (faixa de notas)
Excelente	4 a 5
Bom	3 a 4
Regular	2 a 3
Ruim	1 a 2
Péssimo	0 a 1

Figura 1: níveis de serventia
Fonte: Brasil, 2011

Já a norma do DNIT 008/2003 – PRO estabelece as condições necessárias para a avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos pelo Levantamento Visual Contínuo (LVC), onde determina-se o Índice de Condição de Pavimentos Flexíveis (ICPF), o do Índice de Gravidade Global Expedito (IGGE), e o Índice do Estado de Superfície do Pavimento (IES).

O IRI é uma medida estatística, expressa em m/km, que mensura os desvios da superfície do pavimento em relação aos desvios da superfície projetada (BERNUCCI *et al.*, 2008). Este índice surgiu a partir da pesquisa internacional de avaliação de pavimentos realizada no Brasil, sendo coordenada pelo Banco Mundial com participação dos Estados Unidos, França, Bélgica, Reino Unido e ampla participação do Brasil. O estudo, após analisar vários possíveis índices, escolheu o IRI, que simula a resposta dinâmica de um quarto de carro de referência (*Golden car*), com parâmetros de massa-mola-amortecedores padronizados, que trafega sobre um perfil longitudinal medido (SAYERS e KARAMIHAS, 1998).

Segundo DNIT (2011), a irregularidade longitudinal é definida como o somatório dos desvios da superfície de um pavimento em relação a um plano de referência ideal de projeto, que afeta a dinâmica do veículo, o efeito dinâmico das cargas, a qualidade do rolamento e a drenagem superficial da via. A irregularidade longitudinal é medida ao longo de uma linha imaginária, paralela ao eixo da estrada, geralmente coincidindo com as regiões das trilhas de rodas. De acordo com Bernucci *et al.* (2008), o IRI tem

tido utilizado como ferramenta de controle de obras e aceitação de serviços em alguns países.

Um dos equipamentos mais utilizados mundialmente para a avaliação da irregularidade longitudinal é o perfilômetro inercial a laser (Figura 2), sistema que permite a obtenção do IRI de forma direta em velocidades elevadas.



**Figura 2: perfilômetro utilizado na pesquisa
Crédito: Danilo Rinaldi Bisconsini (2020)**

Barella (2008) cita as partes que compõem um perfilômetro inercial:

- Um ou mais módulos da distância entre o veículo e o pavimento, sem contato e que funcionam a altas frequências;
- Um ou mais sensores de aceleração vertical, que normalmente são instalados dentro dos módulos de medição a laser, devendo estar em perfeito alinhamento com o sistema de medição laser. Os acelerômetros podem gerar informação na mesma frequência dos sensores de distância;
- Um hodômetro de precisão, normalmente ótico, instalado em uma das rodas;
- Um sistema eletrônico ao qual todos os sensores são conectados, que gerencia a coleta dos dados simultânea de cada um dos sensores e o envio de dados para um computador;
- Software capaz de gerenciar toda a coleta de dados e de verificar o funcionamento dos componentes do sistema.

Sayers e Karamihas (1998) destacam algumas características importantes dos perfilômetros: o fato de o equipamento realizar as medições em movimento reduz o risco de acidentes e perturbações na fluidez do trânsito do local: os perfilômetros não devem ser usados em velocidades muito baixas, dependendo da sensibilidade dos acelerômetros utilizados; perfilômetros inerciais não geram perfis exatamente iguais aos obtidos estaticamente (com nível e mira ou Dipstick), entretanto, a partir dos dados coletados é possível calcular com precisão índices relativos à condição superficial, tais como o IRI e QI (Quociente de Irregularidade); os perfilômetros inerciais podem gerar resultados mais confiáveis que os obtidos estaticamente, pois a coleta de dados é automatizada, o que elimina fontes de erros humanos (SAYERS e KARAMIHAS, 1998).

2.4 Equação do IRI e RMSVA

A principal representação da irregularidade longitudinal é o Índice Internacional de Irregularidade (IRI). Esse índice é obtido ao simular a passagem de um quarto de carro sobre um perfil de pavimento medido, conforme mostrado na figura 3.

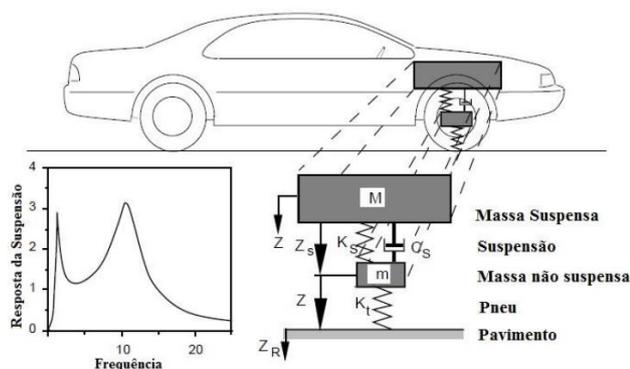


Figura 3: modelo quarto de carro e gráfico de resposta da suspensão em diferentes frequências

Fonte: Bisconsini (2020) adaptado de Sayers e Karamihas (1998)

Em resumo, o cálculo do IRI é realizado considerando o acúmulo dos movimentos simulados das massas suspensas e não suspensas de um modelo de quarto-de-carro, normalizados pelo comprimento do perfil, "L", conforme indicado na equação:

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^T (Z_s - Z_u) dt$$

Onde:

- IRI: Índice de Irregularidade Longitudinal (m/km);
- T: tempo de medição (s);
- L: comprimento do perfil medido (km);
- Z_s : deslocamento da massa suspensa;
- Z_u : deslocamento da massa não suspensa.

Um dos objetivos deste trabalho foi o desenvolvimento de modelos de regressão entre IRI e acelerações fornecidas por smartphones embarcados em ônibus. Para isto, além dos dados de aceleração e GPS coletados dentro de diferentes ônibus, também foram obtidos dados de IRI dos pavimentos existentes ao longo das rotas por onde os ônibus se deslocavam. Os dados foram coletados por meio de um perfilômetro inercial a laser, disponibilizado pelo Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV). Os dados de IRI foram obtidos a cada 100 metros de extensão, totalizando, em média, 120 segmentos no trajeto de ida e 120 segmentos no trajeto de volta.

A coleta de dados do perfilômetro inercial a laser ocorreu no mesmo trajeto, tanto de ida quanto de volta, mas não nos mesmos dias em que se realizou a coleta de dados com smartphones.

Para obter um valor médio de aceleração para os mesmos segmentos de 100 metros de comprimento, calculou-se o RMS (Root Mean Square - Raiz da Média Quadrática ou Valor Eficaz) das acelerações que neste trabalho será denominado como RMSVA - Root Mean Square Vertical Acceleration (Raiz da Média Quadrática da Aceleração Vertical) para destacar que apenas os sinais de aceleração verticais foram utilizados no cálculo do índice. O cálculo do RMSVA é apresentado na Equação:

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

Onde:

- RMSVA: Raiz da Média Quadrática da Aceleração Vertical (m/s²);
- a_z : Aceleração Vertical (m/s²);
- n: número de dados.

Onde os valores de RMSVA foram obtidos após o processo de divisão dos trechos no programa Roadify. Neste processo, os dados de aceleração e IRI obtidos nos mesmos segmentos são separados pelo programa, formando pares, para a

geração dos modelos de regressão. O RMSVA utilizado nos modelos de regressão foram obtidos após a aplicação de filtros sobre sinais de aceleração, como explicado no tópico 3.4

2.5 Smartphones

Para Lemos (2007), o telefone celular é a ferramenta mais importante de convergência midiática nos dias de hoje. Torres (2009) define os smartphones como celulares que oferecem recursos avançados similares aos de um notebook. Os smartphones podem ser classificados também como celulares que possuem habilidade de rodar softwares de terceiros, tipicamente conhecidos como apps (LEE, 2010).

A introdução de smartphones abriu uma indústria de aplicativos que são acessados diariamente, como a consulta por horários de transporte público, atividades de GPS e atualizações meteorológicas e de notícias. Com a disponibilidade de conexões de internet sem fio em todos os smartphones, possibilitou-se a inserção de ferramentas de localização dentro dos aplicativos (Schlotjes *et al*, 2014).

Atualmente, os smartphones chegam à mão dos consumidores com muitos sensores úteis. Um acelerômetro que possui 3 eixos é um dos sensores mais comuns em um smartphone. O acelerômetro fornece as medidas de aceleração em m/s^2 ao longo de cada um dos eixos x, y, z. Ele pode ser usado para reconhecer as atividades de movimento. Nos smartphones, os acelerômetros são originalmente usados para detectar a orientação da tela, bem como em algumas interfaces de usuário e aplicativos (DOUANGPHACHANH e ONEYAMA, 2013).

Bisconsini e Fernandes Júnior (2018) citam que, recentemente, tem-se investigado a coleta de dados com smartphones para a avaliação da condição funcional de rodovias, especialmente pela necessidade de redução de custos que permita um monitoramento periódico, aliada ao avanço tecnológico contínuo desses dispositivos. Citam que a abordagem é baseada na correlação da irregularidade longitudinal de pavimentos com sinais de aceleração verticais fornecidos pelo acelerômetro desses aparelhos, enquanto a localização é indicada pelo GPS (latitude e longitude). Os dados são coletados mediante fixação dos smartphones ao corpo de veículos, de forma que um dos eixos do aparelho esteja posicionado perpendicularmente ao perfil longitudinal da rodovia. Os autores têm buscado

desenvolver um sistema com baixo custo, facilidade de utilização e procedimentos e dados que sejam aplicáveis na prática de monitoramento de rodovias (BISCONSINI; FERNANDES JUNIOR, 2018).

3 METODOLOGIA

3.1 Classificação Metodológica da Pesquisa

Metodologia de acordo com Gerhardt e Silveira (2009) é o estudo dos caminhos e instrumentos utilizados para fazer uma pesquisa científica. Com base nisso, esta pesquisa pode ser classificada da seguinte forma:

- Quanto aos objetivos: pesquisa descritiva, onde é feita a pesquisa do referencial teórico para identificar o que será tratado no trabalho propriamente dito.

- Quanto aos procedimentos: pesquisa bibliográfica e de campo. A pesquisa bibliográfica é baseada em referenciais teóricos já analisados, enquanto a pesquisa de campo se baseia na coleta de dados de aceleração em pontos do ônibus na rota do transporte coletivo.

- Quanto à natureza da pesquisa: pesquisa aplicada, uma vez que gera conhecimentos práticos, envolvendo interesses locais e solucionando problemas específicos.

- Quanto à abordagem: pesquisa quantitativa pois utiliza formas de procedimentos e instrumentos para a coleta de dados com condições de controle, focando na objetividade.

3.2 Aplicativo UTFPR-PB-USP

Para a coleta de dados dentro dos ônibus do transporte coletivo, foi utilizado um aplicativo que foi desenvolvido pelo departamento do curso de Engenharia da Computação da UTFPR do Campus Pato Branco e aperfeiçoado pelo acadêmico do curso de Engenharia da Computação da UTFPR do Campus Pato Branco, Igo Brasil Monteiro. Até o momento da realização desta pesquisa, o app é compatível apenas com smartphones com sistema operacional Android.

A cada coleta, o aplicativo gera arquivos de dados provenientes do GPS, acelerômetro, giroscópio e um arquivo com informações da marca e modelo do smartphone. Para esse trabalho, foram utilizados apenas os arquivos de GPS e de aceleração. O arquivo GPS contém, as coordenadas geográficas, data e hora da coleta, enquanto o arquivo de aceleração contém a aceleração dos eixos x,y e z e

também mostra a data e horário da coleta. A Figura 4 apresenta a tela inicial e a tela de medição do aplicativo.



a) tela inicial

b) tela de medição

Figura 4: aplicativo UTFPR-PB-USB: tela inicial (a); tela de medição (b)

Fonte: UTFPR-PB-USB

3.3 Aplicativo Roadify

As viagens foram divididas em trechos, porém a coleta de dados de aceleração e IRI era feita de forma contínua, desde o início do primeiro do trecho até o fim do último trecho. Para o cruzamento dos dados de IRI e acelerações obtidas em cada trecho, realizou-se a divisão dos dados em um mapa, por meio do aplicativo Roadify.

O Roadfy foi desenvolvido pelo acadêmico do curso de Engenharia da Computação da UTFPR do Campus Pato Branco, Igo Brasil Monteiro. Consiste em um sistema web que também está sendo desenvolvido como complemento ao aplicativo para smartphones utilizado neste trabalho. O sistema oferece ferramentas para segmentação dos trechos, processamento dos dados (aplicação de filtros, passa-banda, passa-alta ou passa-baixa) e análise estatística dos trechos, fornecendo estatísticas descritivas das amostras de aceleração e IRI, testes de normalidade e análise de variância aplicada aos modelos de regressão entre IRI e acelerações. A figura 5 demonstra as fases de processamento do Roadify:

UPLOAD E VISUALIZAÇÃO DOS ARQUIVOS

Envie seus arquivos com dados de aceleração, GPS e perfilômetro para realizar as análises dos dados.

Inserir dados Criar novos intervalos para classificação

Pastas Intervalos

Nome da pasta	Data de criação	Tamanho	
 v1balancotrechovolta	29/03/2023 às 19:43	157.76 MB	
 v1dianteirovolta	01/04/2023 às 07:53	124.38 MB	
 v1traseiro volta	01/04/2023 às 10:28	119.16 MB	
 v2balancovolta	10/04/2023 às 17:50	112.09 MB	
 v3balancovolta	03/04/2023 às 16:01	114.62 MB	

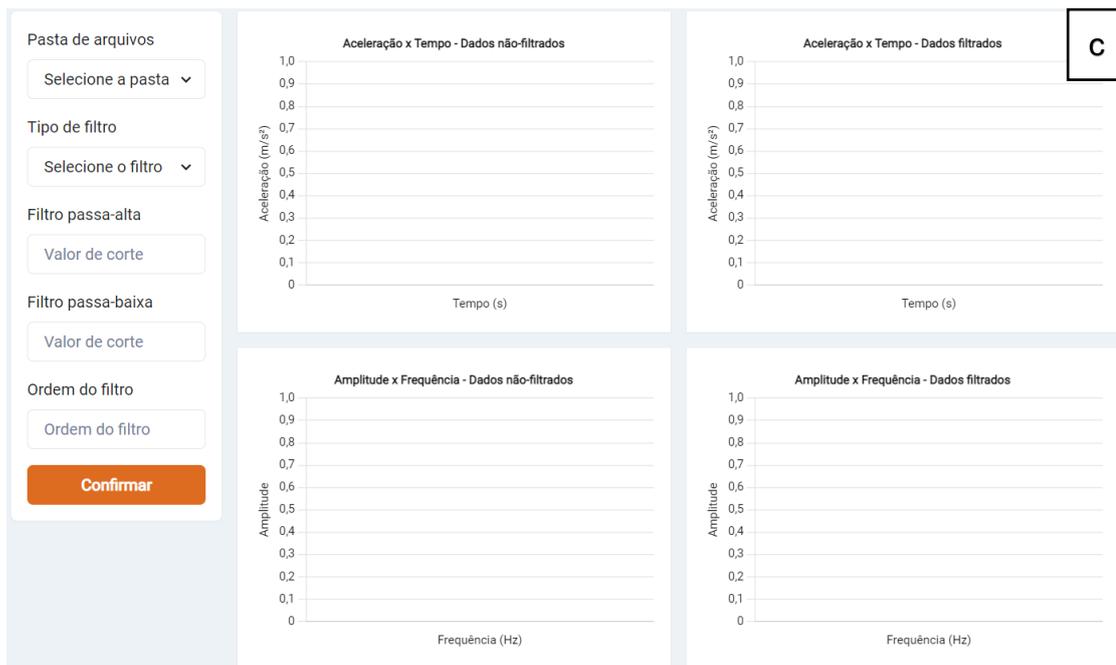
DIVISÃO DOS TRECHOS

Segmente os trechos dos dados utilizando uma ferramenta de SIG.

Pasta de arquivos
v1balancotrechovolta

CONFIRMAR DIVISÃO DOS DADOS





ANÁLISE ESTATÍSTICA

Pasta de arquivos: v1balancotrechovolta ▾

Divisões de trechos para a pasta: V1BALANCOTRECHOVOI ▾

Classificação: Classificação padrão ▾

[Dados](#) | [Estatísticas descritivas](#) | [Teste de normalidade](#) | [Análise de variância](#) | [Gráficos](#)

Exportar dados

Dados por trecho

Velocidade (km/h)	RMSVA (m/s²)	Classificação (ISO 2631-1)	IRI Médio (m/km)	Classificação
15.2600	1.7064	MUITO RUIM	9.3315	MUITO RUIM
17.7138	0.7892	REGULAR	3.4170	REGULAR
28.0710	0.8785	REGULAR	2.8940	REGULAR
11.3408	0.6716	REGULAR	4.2104	RUIM
13.1396	0.8488	REGULAR	6.4130	MUITO RUIM

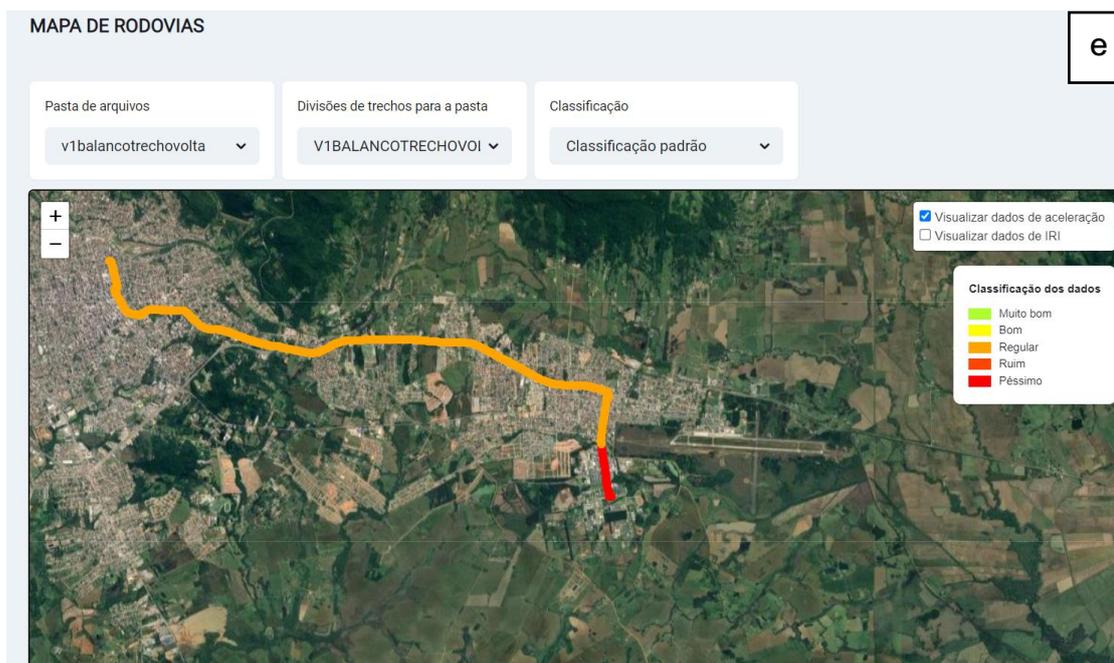


Figura 5: fases de processamento do Roadify: (a) inserir dados; (b) divisão dos trechos; (c) processamento dos dados; (d) análise estatística dos dados; (e) mapa de rodovias
Fonte: Roadify, 2023

3.4 Filtros

Para o cálculo do RMSVA, aplicaram-se filtros passa-banda do tipo Butterworth, de ordem 5, com a finalidade de remover ruídos no sinal, isto é, sinais de acelerações gerados por outros fatores não relacionados com a irregularidade longitudinal dos pavimentos, como vibrações causadas pelo motor do ônibus, trocas de marchas, manobras de aceleração, frenagem e conversões. Para esta pesquisa foram utilizados filtros tipo passa-banda nas faixas de 0,5 a 50Hz, 0,5 a 25Hz, 0,5 a 20Hz e 0,5 a 15Hz. Como mostra a Tabela 1, o filtro passa-banda 0,5 a 15 Hz foi o filtro que apresentou o maior R^2 ajustado, considerando os modelos de regressão entre aceleração (variável independente) e IRI (variável dependente) gerados. Portanto, neste trabalho apresentam-se apenas os modelos obtidos após a aplicação do filtro, de 0,5 a 15Hz.

MÉDIA R^2 AJUSTADO				
SEM FILTRO	0,5 a 50Hz	0,5 a 25Hz	0,5 a 20Hz	0,5 a 15Hz
0,18326	0,17094	0,17736	0,18286	0,20397

Tabela 1: média do R^2 ajustado
Fonte: autoria própria

3.5 Análise do conforto vibracional de usuários

Um dos objetivos deste trabalho foi avaliar o conforto vibracional sentido pelos usuários em uma determinada rota de ônibus de transporte coletivo, a fim de saber qual a escala de conforto obtida através de dados de smartphones em diferentes trechos e posições de assento. As coletas ocorreram em duas rotas de transporte público coletivo da cidade de Santa Maria (RS), sendo a primeira rota denominada de “Vale-UFSM” e a segunda de “UFSM-Vale”. A rota “Vale-UFSM” foi considerada como viagem de ida e a rota “UFSM-Vale” como viagem de volta.

Foram coletados dados em três pontos dentro do ônibus (Figura 6):

- Eixo dianteiro;
- Eixo traseiro; e
- Balanço do ônibus.

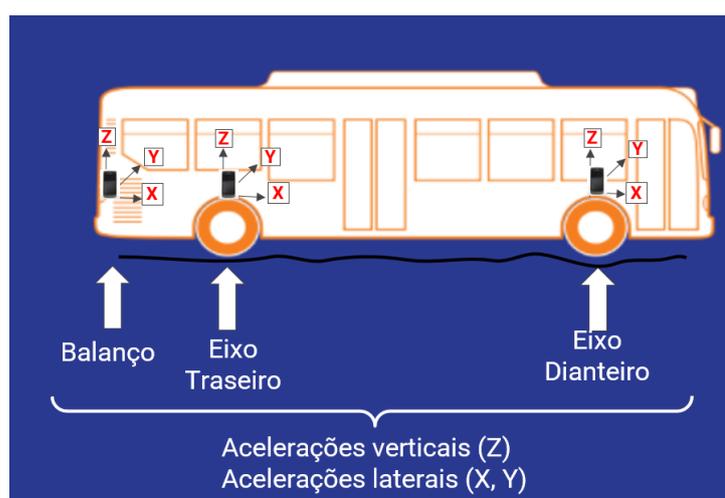


Figura 6: localização dos pontos e configuração do ônibus
Fonte: Autoria própria

A coleta de dados foi realizada sempre por três pessoas, com três smartphones de marcas e modelos diferentes. No eixo traseiro e no balanço do ônibus as coletas foram realizadas sempre com o mesmo smartphone e o mesmo pesquisador. Já no eixo dianteiro, foram coletados dados com dois smartphones diferentes e pesquisadores diferentes.

Os dados do eixo traseiro foram coletados com um smartphone modelo Moto E7 Plus, da marca Motorola, com uma taxa de aquisição média de 381,7 Hz. Os dados do balanço foram coletados por um smartphone marca Xiaomi modelo M210K7AG,

com taxa de aquisição média de 501,77 Hz. Já para o eixo dianteiro foram utilizados dois smartphones em viagens distintas, os dois smartphones eram da marca Motorola, variando apenas os modelos, sendo o primeiro modelo da marca Motorola, modelo Moto G60s com taxa de aquisição aproximadamente à 400,4 Hz, e o segundo modelo também da marca Motorola, modelo MotoG50 5G com taxa de aquisição de aproximadamente 502,6 Hz. As taxas de aquisição de dados foram calculadas considerando-se o número de dados médio obtido por cada smartphone, em relação ao tempo de coleta, considerando-se apenas dados não repetidos. As taxas foram as máximas alcançadas por cada smartphone, que varia de acordo com a capacidade de cada modelo.

Para manter o smartphone na posição vertical, foi utilizado o suporte apresentado na Figura 7, que ficou acoplado à cintura de cada pesquisador. Para reduzir as acelerações causadas por movimentos do pesquisador, estes foram instruídos a manter sua posição tanto quanto possível.



Figura 7: suporte utilizado
Fonte: autoria própria

Foram realizadas quatro coletas na viagem de ida e cinco coletas na viagem de volta, no entanto, nem todas as viagens foram utilizadas nesse trabalho (Tabela 2), pela inconsistência de dados, devido à falta de dados de GPS e aceleração que não foram coletados durante o percurso da viagem.

	Viagem 1		Viagem 2		Viagem 3		Viagem 4		Viagem 5	
	Ida	Volta								
Balanço	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Não	Não
Dianteiro	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	Sim
Traseiro	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Não	Não

Tabela 2: número de viagens consideradas
Fonte: autoria própria

Este trabalho foi realizado em parceria com a UFSM, e desta forma, foram desenvolvidos dois trabalhos de conclusão de curso com os dados obtidos. Neste trabalho, correlacionam-se os dados de aceleração com o IRI, enquanto o trabalho do acadêmico João Pedro Nunes Willes correlaciona os dados de IRI com a opinião de conforto sentido pelos usuários do transporte coletivo nos trechos de ida e de volta (Willes, 2023). Assim, os trechos de ida e os trechos de volta foram subdivididos em trechos maiores do que 100 metros para que os avaliadores pudessem identificá-los com facilidade e opinar sobre as condições de conforto. Os avaliadores participantes desta pesquisa eram alunos da Universidade Federal de Santa Maria e receberam previamente uma explicação de como funcionaria a pesquisa. Em cada viagem de ida e de volta foram estipulados trechos para fazer a divisão de trechos.

Os trajetos de ida e de volta, para este trabalho, foram divididos em trechos de mesmo comprimento, a cada 100 metros. A divisão realizada no programa Roadify, é realizada por meio de uma ferramenta que exibe o comprimento da linha criada (Figura 8).



Figura 8: trechos divididos a cada 100 metros
Fonte: autoria própria

Para a classificação dos trechos em relação ao IRI, o Roadify, utiliza as escalas definidas pelo 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

Tabela 3: classificação do IRI
Fonte: Aplicativo Roadify adaptado de DNIT, 2006

Para classificar o conforto dos usuários, em termos de aceleração vertical, utilizou-se uma adaptação da classificação dada pela norma ISO 2631-1 (1997), proposta por Bisconsini *et al.* (2021):

RMSVA (m/s²)	Nível de Conforto
<0,315	Muito bom
0,315 - 0,63	Bom
0,63 - 1,0	Regular
1,0 - 1,6	Ruim
>1,6	Muito Ruim

Tabela 4: classificação para acelerações verticais baseada na ISO 2631-1 (1997) e adaptada por Bisconsini et al. (2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Velocidade

Realizando a média das velocidades por viagens, obteve-se uma média de 33,7 Km/h. Esse resultado é explicado porque como foi realizado apenas a média das velocidades, considerando o tempo em que há coleta de dados de aceleração enquanto o ônibus está parado, seja devido para embarque e desembarque de passageiro ou devido ao tempo de espera no semáforo. Neste trabalho, a velocidade não foi controlada.

4.2 Estatísticas Descritivas

Na Tabela 5, são apresentadas as estatísticas descritivas dos dados de aceleração, considerando as posições dos eixos dianteiro, traseiro e balanço, e o número da viagem. Também são apresentados os valores de IRI médios obtidos em cada viagem. Como citado na seção de metodologia, dados de determinadas posições não foram obtidas em determinadas viagens.

Comparando as estatísticas obtidas por viagem, entre as três posições, observa-se que o balanço foi o que obteve o maior RMSVA, sendo considerada a posição mais desconfortável dentre as três analisadas. O balanço também atingiu a maior variação do RMSVA. Considerando todas as viagens realizadas, obtiveram-se os valores de RMSVA, médios de 1,19 m/s², 0,69 m/s² e 0,81 m/s², para as posições balanço, dianteiro e traseiro, respectivamente.

Analisando os valores de RMSVA mínimos e máximos, nota-se que, com exceção da viagem 4 IDA e viagem 3 VOLTA, que os valores mínimos e máximos também foram maiores para o balanço. Esta posição apresentou maior variação entre valores mínimo e máximo, de 2,62 m/s², enquanto as posições do eixo dianteiro e eixo traseiro foram de 1,77 m/s² e 2,22 m/s², respectivamente. Analisando os resultados entre eixos dianteiro e traseiro, nota-se que o eixo dianteiro obteve os menores valores de RMSVA, sendo, portanto, a posição que proporcionou maior conforto.

VIAGEM	DATA/ HORÁRIO	POSIÇÃO	RMS (m/s ²)	IRI (m/km)	ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS do RMS (m/s ²)
V1 IDA	12/12/2022 16:53	BALANÇO	1,33	4,63	dp: 0,60 m/s ² ; CV: 45,40; mín: 0,43; máx: 4,06; alc. 3,36; med.: 1,23; P5: 0,65; P95: 2,63; Moda: 1,96; Curt.: 4,78; Ass.: 1,79
		DIANTEIRO	0,36	4,67	dp: 0,29 m/s ² ; CV: 80,46; mín: 0,16; máx: 2,92; alc. 2,76; med.: 0,29; P5: 0,21; P95: 0,65; Moda: 0,22; Curt.:48,31; Ass.: 6,20
		TRASEIRO	0,82	4,61	dp: 0,40 m/s ² ; CV: 48,95; mín: 0,22; máx: 4,40; alc. 2,18; med.: 0,75; P5: 0,36; P95: 1,63; Moda: 1,03; Curt.: 3,17; Ass.: 1,59
V1 VOLTA	12/12/2022 18:00	BALANÇO	1,04	4,09	dp: 0,47 m/s ² ; CV: 45,26; mín: 0,41; máx: 2,98; alc. 2,57; med.: 0,94; P5: 0,51; P95: 1,96; Moda: 1,94; Curt.: 2,53; Ass.: 1,42
		DIANTEIRO	0,47	4,11	dp: 0,20 m/s ² ; CV: 43,02; mín: 0,18; máx: 1,28; alc. 1,10; med.: 0,43; P5: 0,25; P95: 0,95; Moda: 1,11; Curt.: 3,59; Ass.: 1,77
		TRASEIRO	0,62	4,13	dp: 0,29 m/s ² ; CV: 46,94; mín: 0,23; máx: 1,54; alc. 1,31; med.: 0,55; P5: 0,27; P95: 1,19; Moda: 1,48; Curt.: 0,96; Ass.: 1,14
V2 IDA	13/12/2022 08:35	BALANÇO	1,29	4,57	dp: 0,46 m/s ² ; CV: 35,19; mín: 0,52; máx: 3,02; alc. 2,51; med.: 1,20; P5: 0,68; P95: 2,10; Moda: 1,24; Curt.: 1,05; Ass.: 0,86
		DIANTEIRO	0,72	4,61	dp: 0,23 m/s ² ; CV: 31,55; mín: 0,31; máx: 1,40; alc. 1,09; med.: 0,69; P5: 0,39; P95: 1,16; Moda: 0,61; Curt.: 0,81; Ass.: 0,85
		TRASEIRO	0,84	4,57	dp: 0,35 m/s ² ; CV: 41,48; mín: 0,26; máx: 2,78; alc. 2,52; med.: 0,79; P5: 0,38; P95: 1,38; Moda: 0,81; Curt.: 7,10; Ass.: 1,76
V2 VOLTA	13/12/2022 08:56	BALANÇO	1,57	4,07	dp: 0,59 m/s ² ; CV: 37,51; mín: 0,66; máx: 3,67; alc. 3,01; med.: 1,49; P5: 0,80; P95: 2,91; Moda: 1,16; Curt.: 1,95; Ass.: 1,25
		DIANTEIRO	-	-	
		TRASEIRO	0,97	4,11	dp: 0,34 m/s ² ; CV: 35,27; mín: 0,37; máx: 2,01; alc. 1,64; med.: 0,92; P5: 0,47; P95: 1,59; Moda: 0,142; Curt.: 0,58; Ass.: 0,71
V3 VOLTA	12/12/2022 15:23	BALANÇO	1,31	4,09	dp: 0,53 m/s ² ; CV: 40,36; mín: 0,39; máx: 3,05; alc. 2,65; med.: 1,23; P5: 0,67; P95: 2,39; Moda: 1,73; Curt.: 1,22; Ass.: 1,10
		DIANTEIRO	1,31	4,05	dp: 0,50 m/s ² ; CV: 38,43; mín: 0,39; máx: 3,05; alc. 2,65; med.: 1,21; P5: 0,66; P95: 2,36; Moda: 1,73; Curt.: 1,33; Ass.: 1,08
		TRASEIRO	-	-	
V4 IDA	13/12/2022 10:12	BALANÇO	0,6	4,58	dp: 0,24 m/s ² ; CV: 39,95; mín: 0,16; máx: 1,49; alc. 1,33; med.: 0,56; P5: 0,32; P95: 1,10; Moda: 0,36; Curt.: 2,94; Ass.: 1,49
		DIANTEIRO	-	-	
		TRASEIRO	0,78	4,56	dp: 0,27 m/s ² ; CV: 34,16; mín: 0,19; máx: 1,65; alc. 1,46; med.: 0,75; P5: 0,39; P95: 1,27; Moda: 0,59; Curt.: 1,25; Ass.: 0,79
V5 VOLTA	13/12/2022 11:09	BALANÇO	-	-	
		DIANTEIRO	0,6	4,1	dp: 0,21 m/s ² ; CV: 35,30; mín: 0,22; máx: 1,45; alc. 1,22; med.: 0,56; P5: 0,33; P95: 1,02; Moda: 0,62; Curt.: 2,87; Ass.: 1,48
		TRASEIRO	-	-	

Legenda: dp= desvio padrão; CV= coeficiente de variação; mín= mínimo; máx= máximo; alc= alcance; med= mediana; Curt= curtose; Ass= assimetria

Tabela 5: estatísticas descritivas

Fonte: autoria própria

Para a viagem 4 IDA, observa-se que o RMSVA no eixo traseiro foi maior do que no balanço, enquanto na viagem 3 VOLTA, as acelerações no balanço quanto no eixo dianteiro foram iguais, assim como os valores mínimos e máximos.

O IRI descrito em cada viagem da tabela 5, foram obtidos pela média dos trechos divididos a cada 100 metros, em relação a cada posição e para cada viagem. No caso do IRI, as estatísticas descritivas foram obtidas apenas para a viagem 1, tanto de ida quanto de volta, pois o IRI depende apenas das condições do pavimento e não de cada viagem (Tabela 6).

VIAGEM	DATA/ HORÁRIO	IRI	ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DO IRI
V1 IDA	12/12/2022 16:53	4,63	dp: 3,20 m/km; CV: 69,05; mín: 1,51; máx: 17,32; alc: 15,81; med: 3,46; P5: 1,99; P95: 11,73; Moda: 7,72; Curt: 3,27; Ass: 1,89
V1 VOLTA	12/12/2022 18:00	4,09	dp: 2,47 m/km; CV: 60,31; mín: 1,41; máx: 12,91; alc: 11,50; med: 3,37; P5: 1,97; P95: 12,69; Moda: 12,69; Curt: 3,38; Ass: 1,87

Legenda: dp= desvio padrão; CV= coeficiente de variação; mín= mínimo; máx= máximo; alc= alcance; med= mediana; Curt= curtose; Ass= assimetria

Tabela 6: estatísticas descritivas: IRI

Fonte: autoria própria

Seguindo a classificação do DNIT (2006), o trecho de ida foi classificado como “ruim” e o trecho de volta como “muito ruim”, considerando o IRI médio obtido para estes trechos.

4.3 Classificação das acelerações e IRI

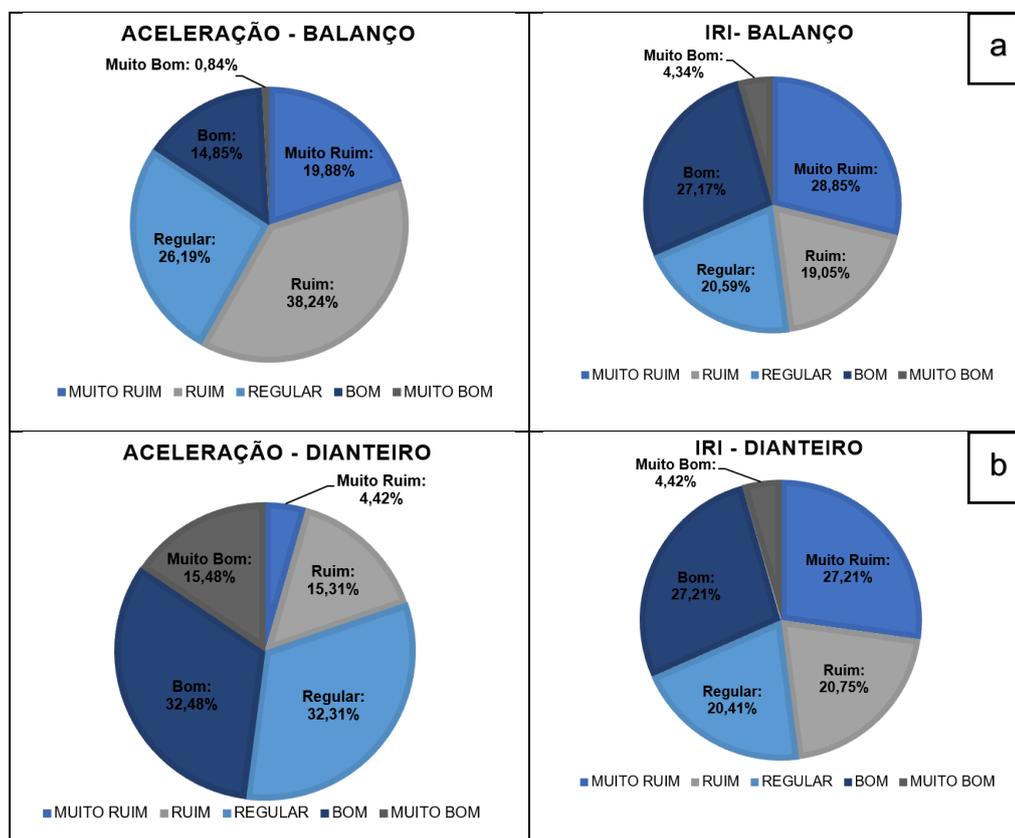
Outra análise realizada foi a classificação das acelerações para cada posição avaliada dentro do ônibus, com base na adaptação da ISO 2631-1 proposta por Bisconsini *et al.* (2021), e a classificação do IRI, conforme as categorias apresentadas pelo DNIT (2006). Os valores percentuais obtidos de IRI, foram encontrados a partir da média de IRI dos dados obtidos a cada 100 metros, para cada posição e para cada viagem. As porcentagens dos trechos classificadas em cada categoria, tanto para o IRI, quanto para o RMSVA das acelerações, são apresentadas na Tabela 7.

CLASSE	POSIÇÃO	ACELERAÇÃO (ISO 2631-1 ADAPTADA)	IRI (DNIT)
MUITO RUIM	BALANÇO	19,888%	28,852%
RUIM		38,235%	19,048%
REGULAR		26,190%	20,588%

BOM	DIANTEIRO	14,846%	27,171%
MUITO BOM		0,840%	4,342%
MUITO RUIM		4,422%	27,211%
RUIM		15,306%	20,748%
REGULAR		32,313%	20,408%
BOM	TRASEIRO	32,483%	27,211%
MUITO BOM		15,476%	4,422%
MUITO RUIM		3,373%	29,174%
RUIM		21,079%	18,550%
REGULAR		46,374%	19,899%
BOM		26,813%	28,162%
MUITO BOM		2,361%	4,216%

Tabela 7: classificação
Fonte: autoria própria

Como apontado pelos resultados das estatísticas descritivas, o balanço foi a posição com maior porcentagem de trechos com classificação “ruim” ou “muito ruim”, e o eixo dianteiro o que apresentou menor porcentagem de trechos classificados como “ruim” e “muito ruim”. Por outro lado, o eixo dianteiro foi a posição que obteve maior porcentagem de trechos avaliados como “bom” e “muito bom”. Um resumo das porcentagens de classificação é apresentado na Figura 9.



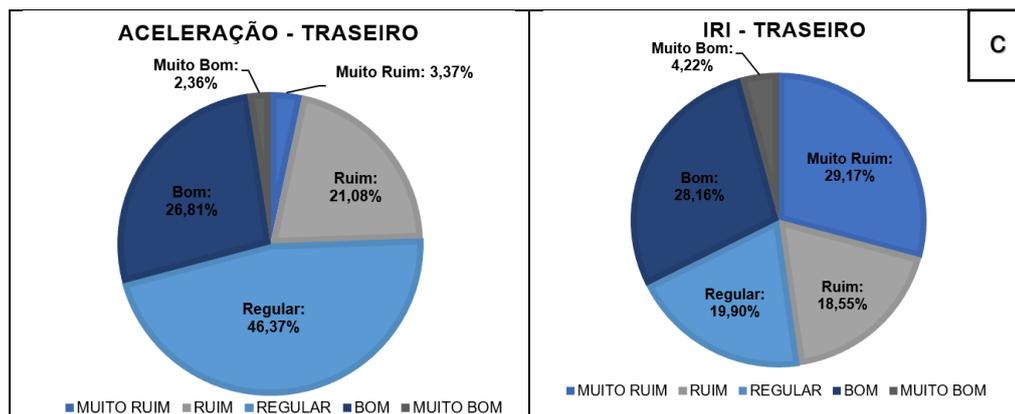


Figura 9: classificação em cada ponto analisado: (a) balanço; (b) dianteiro; (c) traseiro
Fonte: autoria própria

4.4 Modelos de Regressão

Na Tabela 8 são apresentados os dados provenientes dos modelos de regressão entre IRI e RMSVA obtidos. As estatísticas apresentadas são referentes à análise de variância (ANOVA), que compara a distribuição de diferentes grupos. Todos os modelos apresentaram significância considerando um intervalo de confiança de 95% ($F < 0,05$).

Para os resultados de P-valor encontrados, nem todos apresentaram significância, por apresentarem interceptos com um P-valor $> 0,05$. Nestes casos, novos modelos foram criados, com a eliminação destes interceptos, isto é, forçando a linha de tendência a passar pela origem dos eixos. Dessa forma, os coeficientes de determinação (R^2) tiveram um aumento.

No geral, observa-se que os modelos de regressão linear entre IRI e RMSVA não alcançaram valores significativos de R^2 , independentemente da viagem ou posição em que os dados de aceleração foram obtidos, sendo o maior valor de $R^2 = 0,3229$. Acredita-se que o principal fator relacionado aos baixos coeficientes de determinação obtidos esteja relacionado à variação da velocidade ao longo dos trajetos, já que, quanto maior a velocidade, maiores as vibrações, enquanto o IRI permanece inalterado.

VIAGEM	POSIÇÃO	MODELO	RESUMO DE VARIÂNCIA (ANOVA)	VARIÂNCIA ANOVA (0,0)
V1 IDA	BALANÇO	$y=2,0935x+1,8447$	R ² : 0,15644; P-valor: 0,0056107; 0,0000077788; F: 0,0000077788	
	DIANTEIRO	$y=4,9662x+2,85$	R ² : 0,22336; P-valor: 1,84173e-10; 9,66171e-8; F: 9,66171e-8	
	TRASEIRO	$y=4,3602x+1,0403$	R ² : 0,30264; P-valor: 0,064637; 9,13383e-11; F: 9,13383e-11	R ² : 0,7604; y: 5,3854x; P-valor: 2,459e-39
V1 VOLTA	BALANÇO	$y=2,6698x+1,2566$	R ² : 0,25695; P-valor: 0,0064948; 4,70843e-9; F: 4,70843e-9	
	DIANTEIRO	$y=6,8982x+0,8606$	R ² : 0,30329; P-valor: 0,086785; 1,039375e-10; F: 1,039375e-10	R ² : 0,7941; y: 8,4385x; P-valor: 4,831e-43
	TRASEIRO	$y=3,4287x+1,9967$	R ² : 0,15744; P-valor: 0,00013703; 0,0000086542; F: 0,0000086542	
V2 IDA	BALANÇO	$y=1,3079x+2,0121$	R ² : 0,098118; P-valor: 0,0014819; 0,00055285; F: 0,00055285	
	DIANTEIRO	-	-	
	TRASEIRO	$y=3,1385x+1,0670$	R ² : 0,18716; P-valor: 0,090447; 9,96067e-7; F: 9,96067e-7	R ² : 0,7455; y: 5,2176x; P-valor: 9,76e-38
V3 VOLTA	BALANÇO	$y= 2,2838x+1,0995$	R ² : 0,25212; P-valor: 0,034483; 6,91606e-9; F: 6,91606e-9	
	DIANTEIRO	$y= 3,0062x+0,7110$	R ² : 0,29545; P-valor: 0,16799; 2,01437e-10; F: 2,01437e-10	R ² : 0,8002; y: 3,0002x; P-valor: 7,76e-44
	TRASEIRO	-	-	
V4 IDA	BALANÇO	$y=4,3839x+1,9420$	R ² : 0,11977; P-valor: 0,0071911; 0,00010804; F: 0,00010804	
	DIANTEIRO	-	-	
	TRASEIRO	$y= 2,6617x+2,4904$	R ² : 0,057886; P-valor: 0,0028509; 0,0083961; F: 0,0083961	
V5 VOLTA	BALANÇO	-	-	
	DIANTEIRO	$y= 6,5551x+0,1761$	R ² : 0,32291; P-valor: 0,75331; 1,92374e-11; F: 1,92374e-11	R ² : 0,8145; y: 6,8169x; P-valor: 8,176e-46
	TRASEIRO	-	-	

Tabela 8: resumo de variância
Fonte: autoria própria

4.5 Mapa de rodovias

Outra vantagem importante dos smartphones é que estes podem ser associados a aplicativos que fornecem mapas temáticos da condição das vias ou do conforto dos usuários em tempo real. Para ilustrar como esses dados poderiam ser aplicados em um Sistema de Informações Geográficas, utilizou-se o aplicativo Roadify, que permite extrair o mapa de rodovias, indicando as divisões dos trechos e as suas devidas classificações. Na figura 10, apresenta-se a legenda utilizada para as categorias “Muito Bom”, “Bom”, “Regular”, “Ruim” e “Muito Ruim”, utilizadas tanto para a classificação do RMSVA.



Figura 10: legenda de classificação dos trechos
Fonte: Roadify

Na Figura 11 são exibidos os mapas de classificação dos trechos, a cada 100 metros, obtidos por meio do programa Roadify, para os trechos da viagem 1 IDA, para as três posições em que foram coletados. Os mapas apresentados na Figura 11 demonstram, de forma visual, a diferença entre o conforto proporcionado pelas três posições avaliadas.

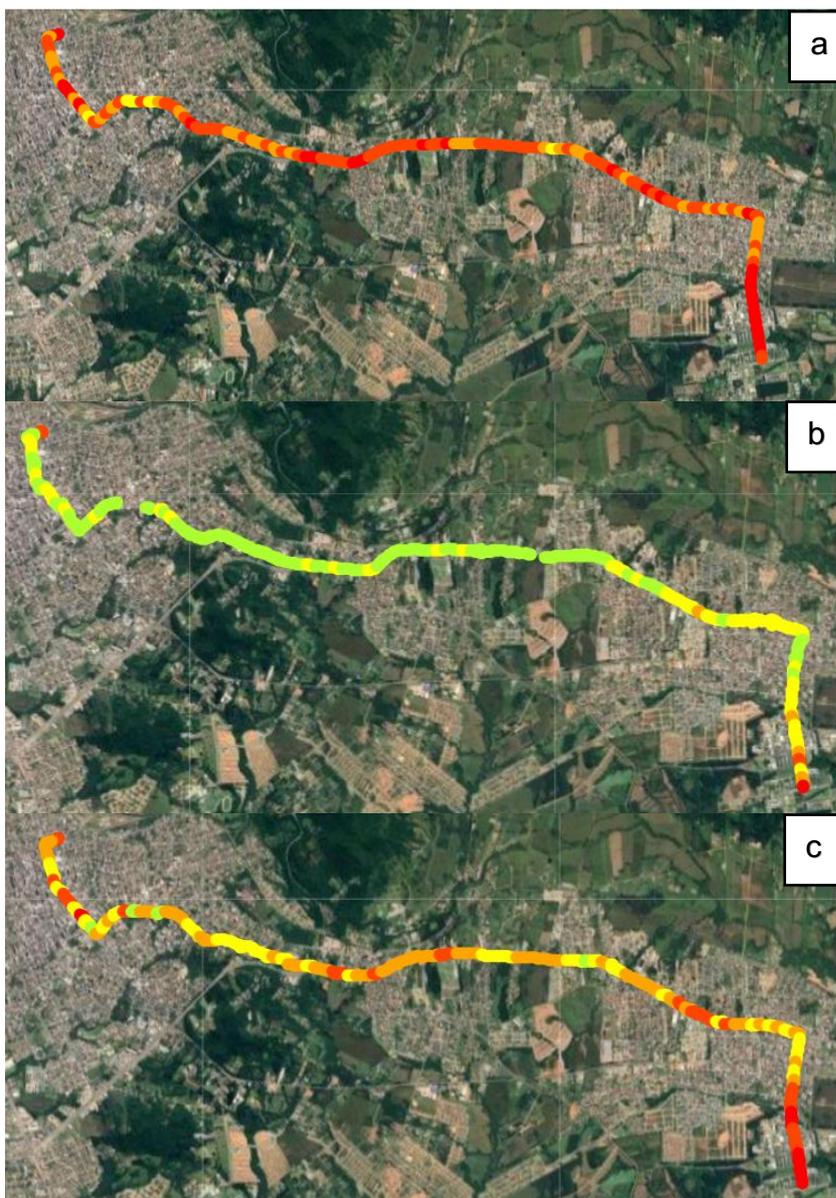


Figura 11: mapa de rodovias para o trecho 1 ida: (a) balanço; (b) eixo dianteiro; (c) eixo traseiro.

Fonte: Roadify

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho analisou-se o conforto de passageiros de ônibus por meio de dados de aceleração verticais fornecidos por smartphones, obtidos nas posições do eixo dianteiro, traseiro e balanço, assim como a correlação entre dados de aceleração e o IRI, sendo este obtido por meio de dados coletados por um perfilômetro inercial a laser nos mesmos segmentos em que os dados de aceleração foram coletados. Os trajetos foram divididos em segmentos de 100 metros, totalizando, em média, 240 segmentos, considerando os trajetos de ida e volta avaliados no estudo, localizados na cidade de Santa Maria (RS).

A partir dos resultados obtidos, observou-se uma diferença significativa entre as acelerações medidas em diferentes posições do ônibus, onde o balanço do ônibus resultou na posição mais desconfortável, enquanto o eixo dianteiro foi considerado o mais confortável.

Quanto aos modelos de previsão de IRI a partir de acelerações coletadas em ônibus, os valores de R^2 ficaram entre 0,057886 e 0,30329, com valor médio de 0,2196. Assim, considera-se que esta abordagem não foi eficiente para prever o IRI de pavimentos urbanos. Dentre os fatores que podem explicar esse resultado, pode-se citar o fato de que o IRI depende apenas da condição do pavimento, enquanto as acelerações são dependentes das características dinâmicas do veículo e forma de condução do veículo. Além disso, o IRI foi desenvolvido para rodovias rurais, nas quais as velocidades são mais elevadas que em ambientes urbanos. O índice é obtido a partir da simulação de um quarto de carro a 80 km/h, enquanto a velocidade média do ônibus foi de 33,7 km/h. Por esse motivo, o índice é menos importante e pouco considerado para a avaliação de vias urbanas. Neste caso, índices alternativos, baseados em dados de aceleração, podem ser mais adequados para a avaliação da qualidade de rolamento, especialmente para sistemas de transporte coletivo. Outro fator que pode ter interferido nos resultados é o fato do smartphone não medir as acelerações verticais diretamente do assento dos usuários. Este fator pode ser melhor avaliado com novos estudos, a partir do uso de acelerômetros externos próprios para o monitoramento de vibrações do corpo inteiro (VCI).

Para este trabalho não foi considerada a variação de velocidade, então, como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se aplicação de filtros de velocidade para

a geração de novos modelos, a fim de se analisar a correlação entre RMS e IRI para determinadas faixas de velocidade (por exemplo, de 40 a 50 km/h). Isto é importante, pois a amplitude das acelerações verticais é dependente da velocidade do veículo, enquanto o IRI é invariável. Outra possibilidade a ser analisada é a normalização do RMSVA pela velocidade. Neste caso, analisa-se a correlação entre IRI e RMSVA/velocidade. Bisconsini (2020) indica que a correlação entre IRI e RMSVA/velocidade é maior quando dados são coletadas a uma velocidade variável.

REFERÊNCIAS

Balcombe, R., Mackett, R., Paulley, N., Preston, J., Shires, J., Titheridge, H., Wardman, M., White, P. (2004). *The Demand for Public Transport: A Practical Guide*. TRL Report TRL593. Wokingham, UK: Transport Research Laboratory.

BARABINO, Benedetto *et al.* **An innovative methodology to define the bus comfort level**. Elsevier, 2019, Cagliari.

BARELLA, Rodrigo Maluf. **Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais**. 2008. Tese doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás, Abeda, 2006.

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

BISCONSINI, D. R.; FERNANDES JR, J. L. Uso de acelerômetros para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos. In: 1º SIMPÓSIO DE TRANSPORTES DO PARANÁ, 2018, Curitiba, Brasil. 2p, março de 2018.

BISCONSINI, Danilo Rinaldi. **Análise de fatores intervenientes na avaliação da condição funcional de pavimentos com smartphones**. 2020. Tese (Doutorado em Infra-Estrutura de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2020. Doi: 11606/T.18.2020.tde-14032022-151311. Acesso em: 2023-05-30.

Bisconsini, D. R., Farias, B. A., Fernandes Jr, J. L., Oliveira, R. A., Bressanelli, T. B., Bueno, M. P. S., Lucas, B. F. K., and Pegorini, V. 2021b. "Monitoramento da Irregularidade Longitudinal de Pavimentos com Dados de Smartphones de Usuários." In 9º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável, Bauru (SP): Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), São Paulo, Brazil.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos. Rio de Janeiro, 1998.

BRASIL. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. Publicação IPR-720. Instituto de Pesquisa Rodoviárias. Departamento Nacional De Infraestrutura De Transporte – DNIT. Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. Manual de Gerencia de Pavimentos. Publicação IPR-745. Ministério dos Transportes. Instituto de Pesquisa Rodoviárias. Departamento Nacional De Infraestrutura De Transporte – DNIT. Rio de Janeiro, 2011.

BUTTLAR, W. G.; ISLAM, S. Effect of Pavement Roughness on User Costs. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No.2285, p. 47-55. Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C, 2012.

CASTRO, Claudio de Moura. **A prática da pesquisa**. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1977. Capítulo III. A escolha do tema. p. 55-80.

CHAVES, José Wémerson Rabelo, *et al.* Análise comparativa da irregularidade longitudinal de pavimento rodoviário em serviço por meio de aplicativos para smartphone. **Revista Tecnologia**, n 02, p. 1-15, 2020.

Coutinho, Gustavo Leuzinger. **A Era dos Smartphones: Um estudo exploratório sobre o uso dos Smartphones no Brasil**. 2014. Trabalho de conclusão de curso. Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

DOMINGUES F. A. A. Notas de aula da disciplina: Irregularidade Longitudinal dos Pavimentos. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Curso de pós-graduação em engenharia de transportes. São Paulo, 2004.

DOUANGPHACHANH, Viengnam. ONEYAMA, Hiroyuki. **A Study on the Use of Smartphones for Road Roughness Condition Estimation. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, Vol.9, 2013.

FERRAZ, Antônio Clóvis “Coca” Pinto; TORRES, Isaac Guillermo Espinosa. **Transporte público urbano**. 2ª edição. São Carlos: RiMa, 2004.

GERHARDT, Tatiane Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de Pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4ª Ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GIL, A. C. Métodos e técnicas da pesquisa social. 6ª Ed. São Paulo: Atlas, 2008.

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.

INTERNATIONAL ORGANIZATION ON STANDARDIZATION (ISO). **ISO 2631-1**: Evaluation of human exposure to whole-body vibration- Part 1: General requirements. Geneva, Switzerland, 1997. 3p.

LEE, Nicole. The 411: Feature Phones Vs. Smartphones. Cnet.com, 2010.

MAIA, Renato Henrique. **Análise de sensibilidade aplicada a estudos de conforto vibracional aplicada a automóveis**. 2002. Tese mestrado. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

Mobilidade Urbana. TCU. Disponível em: <https://portal.tcu.gov.br/tcu/paginas/contas_governo/contas_2010/fichas/Ficha%205.2_cor.pdf>. Acesso em 22 de abr de 2022.

NETO, Antonio Dias De Lima Terceiro. **Avaliação do conforto em infraestruturas cicloviárias com base em irregularidade longitudinal, vibrações medidas por smartphones e percepções dos ciclistas**. 2020. Tese mestrado. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2020.

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

OS GRANDES NUMEROS DA MOBILIDADE URBANA: cenário nacional. **NTU**, 2022. Disponível em: <<https://www.ntu.org.br/novo/AreasInternas.aspx?idArea=7>>. Acesso em: 25/ de abr de 2022.

O USO DE QUESTIONÁRIOS EM TRABALHOS CIENTÍFICOS. Disponível em <http://www.inf.ufsc.br/~vera.carmo/Ensino_2013_2/O_uso_de_questionarios_em_trabalhos_cient%EDficos.pdf>. Acesso em 15 de jun de 2022.

RABAY, L. *et al.* **Prospecção de fatores influenciadores da demanda por transporte público para aplicação ao mercado brasileiro**. In: **Congresso nacional de pesquisa de transporte da ANPET**, n° 31, 2017, Recife.

RIBEIRO, Elisa. A perspectiva da entrevista na investigação qualitativa. In: Evidência, olhares e pesquisas em saberes educacionais. Número 4, maio de 2008. Araxá. Centro Universitário do Planalto de Araxá.

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

SCHLOTJES, M. R.; VISSER, A.; BENNET, C. Evaluation of a smartphone roughness meter. SOUTHERN AFRICAN TRANSPORT CONFERENCE, n° 33. Petroria: 2014, p. 7-10. Disponível em: <http://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/45571/Visser_Evaluation_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 16 de jun de 2022.

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

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

TORRES, Cláudio. *A Bíblia do Marketing Digital*. São Paulo: Novatec editora Ltda., 2009.

VOLPATTO, Carlla *et al.* **Planejamento de transportes urbanos**. Grupo A educação S.A: Porto Alegre, 2019.

WILLES, João Pedro Nunes. **Confronto entre IRI e a percepção de conforto dos usuários do transporte coletivo durante o percurso que atende à UFSM.** Orientador: Deivid da Silva Pereira. 2023. 47f. TCC (graduação) – Curso de engenharia civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023.