



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

CAROLINA GARCIA

**PROCEDIMENTO DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS DO
PAVIMENTO E AVALIAÇÃO SEMIAUTOMATIZADA DE
DEFEITOS (PAIPA)**

Londrina
2025

CAROLINA GARCIA

**PROCEDIMENTO DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS DO
PAVIMENTO E AVALIAÇÃO SEMIAUTOMATIZADA DE
DEFEITOS (PAIPA)**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Heliana Barbosa Fontenele

Coorientador: Prof. Dr. Thiago Botion Neri

Londrina
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Garcia, Carolina.

Procedimento de aquisição de imagens do pavimento e avaliação semiautomatizada de defeitos (PAIPA) / Carolina Garcia. - Londrina, 2025.
104 f. : il.

Orientador: Heliana Barbosa Fontenele.

Coorientador: Thiago Botion Neri.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

Inclui bibliografia.

1. Infraestrutura urbana - Tese. 2. Fotogrametria - Tese. 3. Ortomosaico - Tese. 4. Pavimento - Tese. I. Fontenele, Heliana Barbosa . II. Neri, Thiago Botion. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDU 62

CAROLINA GARCIA

**PROCEDIMENTO DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS DO
PAVIMENTO E AVALIAÇÃO SEMIAUTOMATIZADA DE
DEFEITOS (PAIPA)**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito para a obtenção do título de Doutora.

BANCA EXAMINADORA

Prof Dra. Heliana Barbosa Fontenele
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dra. Eliana Fernandes dos Santos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
- UTFPR

Prof. Dr. Ricardo Almeida de Melo
Universidade Federal da Paraíba - UFPB

Prof. Dr. Jacques Duilio Brancher
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Luciano Nardini Gomes
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Londrina, 04 de setembro de 2025.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me permitir viver a grande oportunidade de realizar este doutorado, concedendo-me forças e coragem em todos os momentos desta caminhada.

À Prof.^a Dra. Heliana Barbosa Fontenele, minha orientadora, registro minha profunda gratidão pela oportunidade de ingresso no programa de doutorado. Agradeço pelas contribuições essenciais ao desenvolvimento deste trabalho e pelo compartilhamento de conhecimentos e experiências que tanto enriqueceram minha formação acadêmica e pessoal.

Ao Prof. Dr. Thiago Botion Neri, meu coorientador e amigo, expresso sincera gratidão pelo incentivo desde o início desta jornada e por acreditar na minha capacidade de enfrentar os desafios do doutorado. Sua presença foi fundamental não apenas para o desenvolvimento da pesquisa, mas também para o meu crescimento acadêmico e pessoal. Agradeço pelo apoio durante os levantamentos de campo, pelas discussões enriquecedoras, pela disponibilidade em cada etapa e, sobretudo, pela amizade, pelas conversas e pelas risadas que tornaram este caminho mais leve.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, ao secretário e aos demais docentes, agradeço pelo apoio institucional e acadêmico.

Aos integrantes do Laboratório LET-CTU/UEL – Laboratório de Engenharia de Transportes da UEL, coordenado pelos professores Carlos Alberto Prado da Silva Junior e Heliana Barbosa Fontenele, agradeço pelo convívio, pelo apoio e pela colaboração, em especial a Larissa e Cláudia, pelo auxílio direto nesta caminhada.

Aos professores Dra. Eliana Fernandes dos Santos, Dr. Ricardo Almeida de Melo, Dr. Jacques Duilio Brancher e Dr. Luciano Nardini Gomes, que gentilmente integraram a banca de avaliação deste trabalho, agradeço pelo tempo dedicado, pelas valiosas sugestões e pelas contribuições que enriqueceram e aperfeiçoaram esta pesquisa. Em especial, ao Prof. Dr. Luciano, não apenas por ter composto a banca, mas também pelo auxílio generoso em diversas etapas da pesquisa.

Aos meus pais, Martha e Junior, meus guias e esteio de vida, registro meu respeito, profunda admiração e eterna gratidão por tudo que sempre fizeram e continuam fazendo por mim.

Ao meu marido, Robson, agradeço por caminhar ao meu lado em todos os momentos desta jornada, compartilhando alegrias, incertezas e desafios. Seu acolhimento, amor e apoio foram fundamentais e me deram forças para seguir adiante. Além disso, registro minha gratidão pela sempre prestativa “assistência técnica computacional”, que salvou este trabalho em diversas ocasiões e que, sem dúvida, merece menção especial.

Aos meus irmãos, Orlando Neto e Juliana, e ao meu cunhado Fábio, agradeço pela compreensão diante das minhas ausências e pelo apoio constante, inclusive pela disposição em me acompanhar e auxiliar nos trabalhos de campo.

Às minhas amigas Ana Lúcia, Ariane e Pollyana pela amizade sincera, pelo carinho sempre presente e pelo incentivo constante em todos os momentos desta trajetória. Agradeço pela companhia e pelo apoio, especialmente durante a etapa de escrita, que foram fundamentais para que eu mantivesse a motivação e a confiança até a conclusão deste trabalho.

Aos amigos e colegas de trabalho, Prof. Dr. Jesner Sereni Ildefonso e Prof. Dra. Claudia Regina Grégio d'Arce Filetti, pelo constante apoio ao longo deste processo. Estendo também meus agradecimentos aos demais colegas do Departamento de Engenharia Civil da UEM.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa, deixo aqui meu sincero reconhecimento e gratidão.

RESUMO

GARCIA, Carolina. **Procedimento de aquisição de imagens do pavimento e avaliação semiautomatizada de defeitos (PAIPA)**. 2025. 104 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2025.

O avanço das tecnologias de fotogrametria e modelagem 3D tem se consolidado como uma ferramenta eficaz para a obtenção de parâmetros geométricos e a quantificação de defeitos em pavimentos urbanos. Neste contexto, esta pesquisa teve como objetivo desenvolver um procedimento para a avaliação da condição da superfície de pavimentos urbanos por meio de imagens digitais. Para isso, foi construído um protótipo de veículo terrestre de tração humana, equipado com uma câmera acoplada. Na fase inicial, foram capturadas imagens em dois formatos — fotografias e vídeos — de um trecho piloto, com os quais foram gerados modelos tridimensionais (*3D mesh*). A captura por vídeo demonstrou ser aproximadamente nove vezes mais ágil em comparação à captura por fotografias. Portanto, a segunda fase da pesquisa foi conduzida exclusivamente com vídeos, a partir dos quais foram gerados ortomosaicos. Em ambas as etapas, empregou-se o *software iTwin Capture Modeler* para a geração dos produtos fotogramétricos. A avaliação da condição do pavimento foi realizada por meio de métodos subjetivos e objetivos, comparando-se os resultados obtidos por inspeção visual *in loco* com aqueles obtidos virtualmente. Os resultados demonstraram alta precisão na reconstrução das superfícies e na detecção de defeitos, possibilitando a extração de métricas detalhadas sobre a extensão e a severidade dos defeitos. A análise comparativa revelou forte correlação entre os dados obtidos a partir das medições virtuais e dos levantamentos manuais, evidenciando a confiabilidade do procedimento desenvolvido. Assim, o procedimento proposto mostrou-se promissor para a modernização e otimização da avaliação da condição de pavimentos urbanos.

Palavras-chave: Condição do pavimento; Modelo 3D; Modelagem tridimensional; Filmagem; Fotogrametria.

ABSTRACT

GARCIA, Carolina. **Pavement image acquisition and distress assessment procedure**. 2025. 104 p. Thesis (Doctorate in Civil Engineering) – Center for Technology and Urbanism, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2025.

The advancement of photogrammetry and 3D modeling technologies has become a reliable tool for obtaining geometric parameters and quantifying distress in urban pavements. In this context, the objective of this research was to develop an alternative procedure for evaluating the surface condition of urban pavements using digital images. To this end, a manually operated ground vehicle equipped with a mounted camera was built. In the first phase, images were captured in two formats—still photographs and videos—from a pilot section, which were then used to generate three-dimensional models (3D mesh). Video capture demonstrated to be approximately nine times faster than photo capture. Therefore, the second phase of the study was conducted exclusively with videos, from which orthomosaics were generated. In both phases, the iTwin Capture Modeler software was used to produce the photogrammetric outputs. Pavement condition assessment was carried out using both subjective and objective methods, comparing results obtained from in loco visual inspections with those obtained through virtual analysis. The results demonstrated high accuracy in surface reconstruction and distress detection, allowing for the extraction of detailed metrics regarding their extent and severity. The comparative analysis revealed a strong correlation between data obtained through virtual measurements and manual surveys, highlighting the reliability of the developed methodology. Thus, the proposed procedure proved to be a promising approach for modernizing and optimizing the evaluation of urban pavement conditions.

Key-words: Pavement condition; 3D models; Three-dimensional Modeling; Filming; Photogrammetry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do método de pesquisa	36
Figura 2 - Localização da UEL	37
Figura 3 - Divisão dos trechos da malha viária do campus	38
Figura 4 – Escala para pontuação das avaliações subjetiva e objetiva	40
Figura 5 – Esboço do protótipo do VPAIPA.....	41
Figura 6 – Itens utilizados para a construção do VPAIPA	42
Figura 7 – Imagens com sobreposição de 84%.....	44
Figura 8 – Marcação no pavimento das 5 linhas de passagem.....	45
Figura 9 – Pontos de amarração sendo inseridos manualmente no programa.	46
Figura 10 – Camadas com cores diferenciando o tipo e a severidade dos defeitos comumente encontrados em vias urbanas.....	52
Figura 11 - Extração de dados no Civil 3D	52
Figura 12 – (a) Seleção dos atributos que serão listados (b) Atributos listados.....	53
Figura 13 – Estrutura do VPAIPA.....	57
Figura 14 – Aerotriangulação com linhas de passagem que se cruzam devido a falhas na manutenção do alinhamento	58
Figura 15 - Modelo descontínuo	59
Figura 16 – Manutenção do alinhamento por meio do esticamento de corda.	59
Figura 17 - Aerotriangulação com alinhamento longitudinal feito pelo método de corda esticada.....	60
Figura 18 – Região do modelo digital com influência de sombras de árvores.....	63
Figura 19 – Box Plot da diferença das medidas obtidas em L02 e F02.....	68
Figura 20 – Box Plot da diferença das medidas obtidas em L02 e V02	69
Figura 21 – Marcações a cada 20 m em trechos retos.....	72
Figura 22 – Marcações a cada 10 m em trechos curvos.	72
Figura 23 – Aerotriangulação com alinhamento longitudinal feito por marcação de pontos no pavimento	73
Figura 24 – Pontuação do ICP da Avaliação Subjetiva de cada UA (a) do trecho B (b) do trecho C (c) do trecho J (d) do trecho K (e) do trecho M	75
Figura 25 - Correlação entre avaliação subjetiva <i>in loco</i> e pelos ortomosaicos	78
Figura 26 - Distribuição das diferenças das Avaliações Subjetivas	79
Figura 27 - Gráfico Boxplot das diferenças das Avaliações Subjetivas	80

Figura 28 – Pontuação do ICP da Avaliação Objetiva de cada UA (a) trecho B (b) trecho C (c) trecho J (d) trecho K (e) trecho M.....	82
Figura 29 – Correlação entre os valores da Avaliação Objetiva <i>in loco</i> e nos ortomosaicos	84
Figura 30 - Distribuição das diferenças das Avaliações Objetivas	85
Figura 31 - Gráfico Boxplot das diferenças das Avaliações Objetivas.....	86
Figura 32 – Pontos de verificação	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Linhas de transporte público que circulam pelos trechos de estudo	39
Tabela 2 – Quantificação dos itens do VPAIPA	42
Tabela 3 - Especificações da câmera	43
Tabela 4 – Tempo gasto para obtenção das imagens digitais dos modelos F02 e V02	60
Tabela 5 – Pontuação da Avaliação Subjetiva	61
Tabela 6 – Pontuação da Avaliação Objetiva	61
Tabela 7 – Número de defeitos localizados e não localizados nos modelos F02 e V02.	62
Tabela 8 – Valores da correlação R-quadrado entre L02 e F02 e L02 e V02.	64
Tabela 9 – Teste de normalidade	65
Tabela 10 – Teste comparativo entre as medições dos levantamentos L02 e F02 ..	66
Tabela 11 – Estatística Descritiva	67
Tabela 12 – Teste comparativo entre as medições dos levantamentos L02 e V02 ..	68
Tabela 13 – Estatística Descritiva	69
Tabela 14 – Teste comparativo entre as medições dos levantamentos F02 e V02 ..	70
Tabela 15 – Resumo da rejeição ou não da hipótese nula.	71
Tabela 16 – Comparação das medições sem a influência dos defeitos não localizados.	71
Tabela 17 – Quantidade de UAs que apresentaram classificações diferentes pela avaliação subjetiva in loco x ortomosaico	74
Tabela 18 - Avaliação subjetiva por trecho	76
Tabela 19 - Avaliação objetiva por trecho	83
Tabela 20 – Testes de hipóteses das medidas de referência no início, meio e final das UAs	88
Tabela 21 – Limitações do PAIPA e propostas para trabalhos futuros	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	American Association of State Highway Officials
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
CMTU	Companhia Municipal de Trânsito e Urbanização (Londrina)
CNN	Convolutional Neural Network (Rede Neural Convolucional)
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
GSD	Ground Sample Distance (Distância de Amostra no Solo)
HC	Hospital de Clínicas
IA	Inteligência Artificial
ICP	Índice de Condição de Pavimento
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)
IRI	International Roughness Index (Índice Internacional de Rugosidade)
M&R	Maintenance and Rehabilitation (Manutenção e Reabilitação)
PAIPA	Procedimento de Aquisição de Imagens do Pavimento e Avaliação Semiautomatizada de Defeitos
PCI	Pavement Condition Index (Índice de Condição do Pavimento)
SGP	Sistema de Gerência de Pavimentos
SGPU	Sistema de Gerência de Pavimentos Urbanos
SN	Número Estrutural (sigla em inglês)
SR	Resistência à Derrapagem (sigla em inglês)
TIL	Transporte Integrado de Londrina
UA	Unidade Amostral
UEL	Universidade Estadual de Londrina

VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VPAIPA	Veículo para Procedimento de Aquisição de Imagens do Pavimento e Avaliação
VSA	Valor de Serventia Atual

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO GERAL	17
1.1.1 Objetivos Específicos	17
1.2 JUSTIFICATIVA.....	17
1.3 ESTRUTURA DA TESE.....	18
2 VISÃO GERAL	19
2.1 SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS	20
2.2 AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PAVIMENTOS	23
2.3 AVALIAÇÃO SUBJETIVA	25
2.4 AVALIAÇÃO OBJETIVA	29
2.5 FOTOGRAMETRIA APLICADA A AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS.....	32
3 MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	37
3.2 FASE 1 – AVALIAÇÕES SUBJETIVA E OBJETIVA.....	39
3.3 FASE 1 - DESENVOLVIMENTO DO VPAIPA.....	41
3.4 FASE 1 - PARÂMETROS E EXECUÇÃO DO PROCEDIMENTO DE CAMPO	43
3.5 FASE 1 - GERAÇÃO DOS MODELOS DIGITAIS (3D MESH)	45
3.5.1 Modelo gerado a partir de fotos.....	47
3.5.2 Modelo gerado a partir dos vídeos	48
3.6 FASE 1 – AVALIAÇÃO SUBJETIVA PELOS MODELOS.....	48
3.7 FASE 1 – MEDIÇÃO DOS DEFEITOS NO PAVIMENTO	49
3.8 FASE 1 - COMPARAÇÃO DAS MEDIÇÕES	50
3.9 FASE 2	51
3.9.1 Geração dos modelos digitais – ortomosaicos e medição dos defeitos.....	51
3.9.2 Aplicação de novos testes estatísticos	53
3.9.2.1 Teste dos Sinais	53

3.9.2.2	Teste TOST com teste dos Sinais	54
3.9.2.3	Correlação de Spearman.....	55
3.9.2.4	Código para aplicação dos testes estatísticos	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
4.1	FASE 1 - DESENVOLVIMENTO DO VPAIPA.....	57
4.2	FASE 1 – TESTE PILOTO	58
4.2.1	Alinhamento longitudinal.....	58
4.2.2	Tempo para geração das imagens	60
4.2.3	Avaliação subjetiva e objetiva.....	61
4.2.4	Avaliação objetiva com análise dos defeitos par a par	62
4.2.5	Testes de hipóteses.....	64
4.2.5.1	Teste de normalidade.....	65
4.2.5.2	Comparação entre L02 e F02.....	66
4.2.5.3	Comparação entre L02 e V02	68
4.2.5.4	Comparação entre F02 e V02	70
4.2.5.5	Comparações sem os defeitos não localizados.....	71
4.3	FASE 2 – ALINHAMENTO LONGITUDINAL	72
4.4	FASE 2 - ANÁLISE DA AVALIAÇÃO SUBJETIVA	73
4.4.1	Testes de hipóteses com os dados da Avaliação Subjetiva	76
4.5	FASE 2 – ANÁLISE DA AVALIAÇÃO OBJETIVA	80
4.5.1	Testes de hipóteses com os dados da Avaliação Objetiva	83
4.5.2	Fidelidade geométrica dos ortomosaicos	87
4.6	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	89
5	CONCLUSÕES.....	90
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
	APÊNDICE A – ALGORITIMO	97

1 INTRODUÇÃO

Os defeitos na superfície do pavimento afetam as condições de conforto e segurança do usuário, além de elevar os custos de manutenção dos veículos, o consumo de combustível e o desgaste dos pneus, bem como constituir riscos para a integridade dos veículos. Além disso, o aumento da quantidade e severidade de defeitos no pavimento são progressivos com o decorrer do tempo. Desta forma, se não forem tratados no início, ocorrerá deterioração progressiva do pavimento, causando uma elevação nos custos necessários para sua revitalização.

Diante desse cenário, o monitoramento e a avaliação contínua das condições dos pavimentos são essenciais para garantir a eficiência e a durabilidade dos pavimentos rodoviários e urbanos. Tradicionalmente, a inspeção visual e as medições manuais têm sido as principais formas de identificar e classificar os defeitos, porém essas técnicas apresentam limitações quanto à subjetividade dos avaliadores e à cobertura espacial das áreas inspecionadas.

A necessidade de métodos mais eficazes e automáticos tem levado à busca por tecnologias inovadoras que possam fornecer uma análise mais detalhada e precisa da superfície dos pavimentos.

Entre as alternativas promissoras, destaca-se o uso da fotogrametria, técnica de extração de medidas e informações tridimensionais a partir de múltiplas imagens bidimensionais. Com o avanço da tecnologia, *softwares* especializados são capazes de processar essas imagens para gerar modelos tridimensionais detalhados, mapas de elevação e ortomosaicos.

No contexto da avaliação de pavimentos, a fotogrametria pode ser usada para criar um modelo digital da superfície da via. Tais modelos podem ser utilizados em análises manuais (baseadas em humanos), automatizadas (baseadas em máquinas) e semiautomatizadas (combinação de análise humana e computacional). Nas análises manuais, o especialista classifica os defeitos do pavimento por meio da análise visual do modelo. Já em processamentos automatizados e semiautomatizados, são utilizados *softwares* para identificação e classificação das imagens (Sholevar; Golroo; Esfahani, 2022).

Independentemente da forma de análise, é de suma importância a comparação das medições realizadas *in loco* com as medições realizadas nos modelos digitais, a fim de validar o método de obtenção de imagens e medição dos defeitos. Assim, nesta

pesquisa é proposto um novo método de aquisição de imagens digitais do pavimento, geração e análise manual de modelos tridimensionais.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma proposta de procedimento padronizado de avaliação semiautomatizada de defeitos do pavimento por meio de imagens digitais, denominado PAIPA (Procedimento de Aquisição de Imagens do Pavimento e Avaliação Semiautomatizada de Defeitos).

1.1.1 Objetivos Específicos

- Desenvolver um procedimento para a captura de imagens de pavimentos de vias urbanas;
- Estabelecer um protocolo metodológico para o processamento e interpretação dessas imagens;
- Testar o procedimento proposto (PAIPA) por meio da aplicação em diferentes condições de pavimento;
- Propor recomendações para a implementação do PAIPA no monitoramento e manutenção de pavimentos, considerando a viabilidade técnica e os potenciais benefícios na gestão da infraestrutura viária.

1.2 JUSTIFICATIVA

A gestão eficiente da malha viária urbana exige informações atualizadas, sistematizadas e confiáveis sobre a condição das superfícies dos pavimentos. Os métodos convencionais de inspeção, majoritariamente baseados em avaliações visuais *in loco* são geralmente morosos e sujeitos a subjetividades que podem comprometer a confiabilidade dos dados coletados.

Neste contexto, justifica-se a proposição de um procedimento alternativo — o PAIPA — que integra a captura de imagens, a geração de modelos digitais e a interpretação de defeitos em pavimentos urbanos. A partir desse procedimento, é possível organizar um banco de dados robusto contendo registros visuais e descritivos

da condição das vias, o que favorece o monitoramento contínuo, a rastreabilidade das intervenções e a análise técnica comparativa ao longo do tempo.

A inclusão de imagens e modelos tridimensionais no processo de avaliação permite maior detalhamento na identificação de defeitos e contribui para a objetividade das decisões técnicas. Dessa forma, o presente trabalho busca apoiar os gestores públicos na definição de estratégias mais eficazes de manutenção, promovendo a modernização dos processos de diagnóstico e gestão da infraestrutura viária urbana.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

O presente texto encontra-se dividido em cinco capítulos, com a seguinte distribuição:

- *Capítulo 1:* É a parte introdutória, onde estão o objetivo geral, objetivos específicos e a justificativa da pesquisa;
- *Capítulo 2:* Contém a revisão de literatura com conceitos base para a construção do método desenvolvido nesta pesquisa;
- *Capítulo 3:* É apresentado o método subdividido em duas fases, a primeira que contempla os métodos aplicados para a realização de testes pilotos e a segunda que engloba o ajustamento do protocolo metodológico proposto, ambas as fases contendo as descrições dos procedimentos e ferramentas de análise utilizadas;
- *Capítulo 4:* Neste capítulo são apresentados os resultados das etapas duas etapas de pesquisa, bem como as limitações do método proposto
- *Capítulo 5:* Por fim são apresentadas algumas considerações a respeito do que foi realizado na pesquisa.

2 VISÃO GERAL

A ocorrência de defeitos na superfície de pavimentos de rodovias ou vias urbanas requer uma avaliação periódica da condição dos pavimentos, isso porque quando não tratados no início, a progressão destes defeitos gera aumentos substanciais dos custos para revitalização do pavimento e muitas vezes, incluem a necessidade de refazer a estrutura do pavimento por completo

Tradicionalmente, essa coleta de dados tem sido realizada utilizando metodologias de inspeções manuais ou visuais, métodos que, apesar de amplamente utilizados, apresentam limitações significativas. Entre essas limitações, destacam-se a subjetividade das análises, a variabilidade dos dados devido à interpretação dos avaliadores, a possibilidade de erros humanos, o tempo necessário e os elevados custos relacionados à alocação de recursos humanos (Li et al., 2023).

Diante dessas dificuldades, desponta a primordialidade de métodos mais eficientes e precisos. A fotogrametria tem se mostrado uma alternativa promissora, pois possibilita a criação de modelos tridimensionais a partir de séries de imagens. Esses modelos podem ser analisados manualmente (por especialistas), de forma automatizada (algoritmos) ou semiautomatizada (combinando intervenção humana e computacional). No processamento automatizado e semiautomatizado, *softwares* especializados são utilizados para identificar e classificar os defeitos com base nas imagens coletadas (Sholevar, Golroo e Esfahani, 2022; Liu et al., 2024).

Na intenção de comparar o método para garantir a confiabilidade entre as medições de modelos digitais e modelos direto do campo, pode-se utilizar a validação que assegura a precisão dos modelos tridimensionais e da metodologia de análise dos defeitos. Por isso, nesse contexto a pesquisa apresentará a Proposta De Procedimento de Aquisição de Imagens do Pavimento e Avaliação de Defeitos (PAIPA).

Para tanto, serão abordados os tópicos e definições, quanto ao Sistema de Gerência de Pavimentos, a avaliação da condição de pavimentos, avaliação Subjetiva, avaliação objetiva.

2.1 SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS

Um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) consiste na integração de componentes que operam em sinergia para otimizar as decisões e ações realizadas pelos gestores de infraestruturas viárias. Este sistema abrange etapas de planejamento, construção, manutenção, avaliação e pesquisa, e devem ser sustentadas e embasadas por um banco de dados atualizado continuamente. Tal estrutura permite uma gestão eficiente e maximiza o uso racional dos recursos disponíveis, promovendo maior durabilidade e funcionalidade dos pavimentos (Farashah e Tighe, 2014).

De acordo com Páez (2015), um SGP é uma ferramenta utilizada para reduzir os custos de manutenção e reabilitação necessários para que o pavimento apresente uma condição ótima de funcionamento. Essa redução para estudos com realização de reparos preventivos, no tempo correto, pode resultar em uma economia significativa, reduzindo os custos em até quatro vezes em comparação com intervenções tardias, quando o pavimento já se encontra em estado avançado de deterioração (Farashah & Tighe, 2014; Liu *et al.*, 2024).

Além disso, otimiza os recursos públicos, proporcionando benefícios aos usuários, incluindo tempo de viagem, menores custos de manutenção de veículos e aumento da segurança viária, refletindo, inclusive, em ganhos econômicos e sociais significativos. Tudo isso torna o SGP crucial e relevante em cenários de restrições orçamentárias, no qual a eficiência na alocação de recursos é direcionada na melhoria da aplicação de sustentabilidade da infraestrutura rodoviária.

A gestão de pavimentos no Brasil tem se caracterizado, frequentemente, por uma abordagem empírica baseada na experiência de engenheiros municipais. Zanchetta (2017) aponta que os procedimentos recentes que são praticados pelos gestores públicos para manutenção e reabilitação da malha viária pavimentada traduzem-se em operações ineficientes conhecidos como “tapa-buracos” e recapeamentos, que resultam em pavimentos de baixa qualidade e consequente alto custo.

Esse modelo, associado à escassez de recursos, ao desconhecimento ou até mesmo ao receio em adotar métodos inovadores, contribui para a utilização ineficiente dos recursos disponíveis. A dependência de práticas tradicionais muitas vezes impede

a aplicação de tecnologias e ferramentas avançadas que poderiam otimizar o processo de tomada de decisão.

Dessa forma, a implementação de Sistemas de Gerência de Pavimentos apresenta um potencial significativo para transformar essa dinâmica, fornecendo uma abordagem baseada em dados e modelos preditivos. Esses sistemas oferecem a análise minuciosa das condições do pavimento, identificando intervenções prioritárias e estratégicas econômicas, além de integrar áreas técnicas, administrativas e financeiras, promovendo maior eficiência operacional (Hajek et al., 2019).

Nesse contexto, o avanço de tecnologias como a fotogrametria emerge como uma ferramenta complementar indispensável aos SGPs. A coleta de dados deve ser confiável, bem estruturada, planejada e com treinamento adequado dos profissionais envolvidos. E as informações devem ser facilmente acessíveis e atualizadas de forma contínua para garantir a acurácia das decisões tomadas (DNIT, 2011).

A qualidade da coleta de dados influencia diretamente a precisão dos modelos preditivos utilizados no planejamento e manutenção de pavimentos. Além disso, Wolters et al. (2019) enfatizam que um sistema de coleta bem projetado, com ferramentas tecnológicas como sensores automáticos e sistemas georreferenciados, pode aumentar significativamente a eficiência do gerenciamento.

Já Zanchetta (2017) destaca que a capacitação técnica da equipe responsável pela coleta de dados é essencial para garantir que as informações reflitam a realidade da condição do pavimento, reduzindo os riscos de decisões equivocadas. Os autores reforçam a importância de integrar inovação tecnológica e capacitação profissional no ciclo de coleta e análise de dados, fornecendo suporte robusto para a tomada de decisões e priorização das intervenções.

Wolters et al. (2019), também destacam a relevância de integrar dados de alta precisão e tecnologias avançadas, como a fotogrametria e o mapeamento georreferenciado (Amekudzi, 1996), para melhorar a confiabilidade das análises e efetividade das decisões tomadas em níveis específicos. Essa evolução permite que o SGP seja mais eficiente, não apenas na priorização, mas também no desenvolvimento de soluções personalizadas para diferentes condições do pavimento.

O monitoramento da condição dos pavimentos envolve quatro indicadores principais: Índice de Condição do Pavimento (PCI), que avalia as condições superficiais; o Índice Internacional de Rugosidade (IRI), que mensura a qualidade de

rodagem; o Número Estrutural (SN), que avalia a capacidade estrutural; e a Resistência à Derrapagem (SR), relevante para a segurança viária. Cada métrica, de forma crítica, é essencial para decisões de manutenção e reparo para priorização de recursos (DNIT, 2011).

A implantação de um Sistema de Gerência de Pavimentos Urbanos (SGPU) requer a adoção de práticas eficientes, como métodos simples para levantamento de dados, armazenamento e análise informatizada das informações, além da integração entre os departamentos responsáveis. Páez (2015) destaca a importância do treinamento contínuo dos profissionais envolvidos na coleta dos dados, com foco em garantir a precisão da avaliação das condições dos pavimentos. De forma semelhante, Oliveira, Silva Junior e Fontenele (2013) enfatizam a necessidade de conhecimento técnico dos avaliadores, já que a fase de avaliação é fundamental no processo.

A implementação de um SGPU também traz benefícios, como a promoção de licitações para obras preventivas, redução de custos e incentivo à pesquisa em pavimentação (Oliveira et al., 2012; Hosten et al., 2013). Zanchetta (2017) conclui que as atividades gerenciadas por um SGPU podem ser duas vezes mais econômicas do que as práticas tradicionais, como recapeamentos e reparos pontuais.

O monitoramento tradicional dos pavimentos, muitas vezes realizado por meio de inspeção manual, apresenta limitações significativas. Este processo é demorado, laborioso e propenso a erros, como a identificação imprecisa de pequenas falhas. Tais limitações não apenas comprometem a confiabilidade das avaliações, mas também dificultam a tomada de decisão estratégica no gerenciamento de pavimentos (Zanchetta, 2017).

O uso de algoritmos de Inteligência Artificial (IA) tem transformado significativamente a gestão de pavimentos. Tecnologias de aprendizado de máquina, visão computacional e redes neurais têm sido aplicadas para identificar falhas, modelar desempenho e planejar manutenções de forma precisa e eficiente. Xu e Zhang (2021) revisaram os avanços na aplicação de IA categorizando suas utilizações em três áreas principais: avaliação de falhas, previsão de desempenho e programação de manutenção e reabilitação (M&R). A IA oferece não apenas automação, mas também maior acurácia, superando os desafios das inspeções manuais.

A integração da fotogrametria e da inteligência artificial representa o próximo passo na evolução da detecção de condições de pavimentos. A fotogrametria permite capturar dados tridimensionais precisos sobre a superfície dos pavimentos, enquanto

os algoritmos de IA analisam os dados em tempo real, identificando padrões de deterioração e sugerindo intervenções. Essas tecnologias combinadas oferecem uma abordagem robusta e econômica, facilitando a priorização de reparos e o planejamento estratégico.

A integração de técnicas de IA e Internet das Coisas (IoT) tem o potencial de transformar o processo de aquisição de imagens para detecção de defeitos de pavimentos. Essas tecnologias reduzem a subjetividade das inspeções manuais e superam desafios associados a fatores como localização e condições climáticas adversas durante a coleta de dados (Kim et al., 2022).

As tecnologias para aquisição de imagens para monitorar pavimentos emprega dispositivos como *smartphones*, câmeras tradicionais e Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) que se destacam pela mobilidade e flexibilidade, alcançando áreas inacessíveis ou desafiadoras para inspeção manual. Além disso, os VANTs possibilitam uma cobertura mais ampla e a coleta de dados em alta resolução, como resultado oferece análises detalhadas (Jiang et al., 2021).

2.2 AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PAVIMENTOS

A avaliação da condição de pavimentos é fulcral para os SGPs, pois permite conhecer o estado real das infraestruturas, identificar intervenções necessárias, avaliar a qualidade de manutenções passadas e verificar o desempenho do pavimento ao longo do tempo (Haas; Hudson, 1978). Por indicadores de desempenho, é possível qualificar a condição de um pavimento, levando em consideração fatores como defeitos superficiais, rugosidade e resistência ao desgaste.

A aplicação de técnicas de avaliação da condição dos pavimentos, incluindo medidas diretas de defeitos superficiais e a utilização de índices de qualidade, permite uma abordagem mais objetiva e previsível na gestão de manutenção. A eficácia de um SGP depende da precisão na coleta de dados, como sugere o modelo de Haas e Hudson (1978), que enfatiza a importância de uma avaliação detalhada e da integração de dados de diferentes fontes para um diagnóstico confiável. Para alcançar um bom desempenho do sistema, é importante que os dados sejam processados de maneira eficiente e que os avaliadores possuam conhecimento técnico sobre os

critérios e métodos utilizados para determinar o estado dos pavimentos (Amekudzi e Attoh-Okine, 1996).

Esses métodos não apenas oferecem informações críticas para intervenções precoces e eficazes, mas também ajudam a otimizar os recursos destinados a operações de manutenção, como observado em estudos de Hosten et al. (2013) e Zanchetta (2017), que destacaram a redução de custos com a implementação de sistemas de gerenciamento adequados.

Em resumo, a avaliação contínua e a utilização de dados detalhados sobre a condição dos pavimentos são fundamentais para o sucesso a longo prazo de qualquer SGP. Vale salientar que, ainda que muito importantes, são dispendiosas de recursos (Farashah, 2012; Bektas, Smadi e Nlenanya, 2015). Assim, os gestores devem escolher a técnica de avaliação mais adequada aos objetivos e ao orçamento disponível.

A condição do pavimento pode ser verificada sob quatro aspectos principais: conforto ao rolamento, capacidade de suportar a carga, segurança para os usuários e a aparência estética (Danieleksi, 2004). No modo manual, os avaliadores percorrem a via para coletar as informações necessárias, o que exige grande experiência (Osorio, 2015). Apesar de proporcionar maior precisão, esse método demanda mais tempo e recursos humanos.

Tradicionalmente, a avaliação da condição é baseada em métodos manuais que exigem grande investimento de tempo e recursos humanos, além de estarem sujeitos a erros humanos e variações subjetivas. No entanto, tecnologias emergentes, como o uso de *deep learning* e análise de imagens, estão transformando essa prática.

De acordo com estudos recentes, os métodos automáticos e semiautomáticos de coleta de dados, que utilizam imagens digitais e algoritmos de processamento, têm se mostrado mais eficazes e confiáveis em comparação aos métodos tradicionais (McKeever et al., 2022; Lee et al., 2024). Por exemplo, uma abordagem inovadora envolve o uso de algoritmos de *deep learning* para detectar e classificar trincas nos pavimentos, com precisão de até 95%, além de estimar a largura das trincas, o que melhora a avaliação do índice de condição dos pavimentos (Lee et al., 2024). Essa técnica não apenas agiliza a coleta de dados, mas também oferece maior precisão e redução de custos operacionais.

Além disso, a pesquisa de McKeever et al. (2022) ressalta a importância dos sistemas de sensoriamento visual inteligente, que, embora ainda enfrentem desafios

relacionados à variação ambiental e tipo de pavimento, têm o potencial de transformar a maneira como as avaliações são feitas, proporcionando um diagnóstico mais rápido e com menor margem de erro.

A adoção dessas tecnologias é um reflexo da evolução nas práticas de gerência de pavimentos, buscando integrar métodos eficientes de coleta e análise de dados para otimizar a alocação de recursos e melhorar a durabilidade das infraestruturas rodoviárias. Essas abordagens são especialmente relevantes para a avaliação de pavimentos em redes locais e regionais, onde a demanda por soluções mais acessíveis e ágeis é crescente.

A escolha do método e da técnica de avaliação do pavimento deve ser alinhada com os objetivos específicos do processo de inspeção e as condições orçamentárias e operacionais. Assim, diferentes tipos de avaliação podem ser adotados para analisar a condição dos pavimentos, levando em consideração fatores como a precisão desejada, os recursos disponíveis e a natureza do pavimento. A seguir, são discutidos os principais métodos e técnicas utilizados na avaliação das superfícies de pavimentos flexíveis.

2.3 AVALIAÇÃO SUBJETIVA

A avaliação subjetiva de pavimentos foi introduzida na década de 1950 a partir dos estudos realizados pela *American Association of State Highways Officials* (AASHO), agora *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), com o intuito de medir a adequação de um pavimento com base na percepção dos usuários. Durante o AASHO Road Test, foi desenvolvido o *Present Serviceability Ratio* (PSR), um índice que reflete a qualidade do pavimento com base na opinião de um grupo de avaliadores. Estes atribuíam uma nota de 0 a 5, sendo 0 a pior condição e 5 a melhor, de acordo com o conforto percebido ao dirigir sobre o pavimento.

No Brasil, o conceito de serventia foi adaptado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), por meio da PRO 009/2003, que estabelece o Valor de Serventia Atual (VSA). O processo de avaliação é realizado por um grupo de cinco avaliadores, que percorrem um trecho do pavimento em um veículo a uma velocidade regulamentada e, em seguida, atribuem uma nota de 0 a 5 com base no conforto percebido durante a viagem. A média das notas resulta no VSA, que é

utilizado para classificar a condição do pavimento em termos de sua serventia, oferecendo uma forma prática de avaliação, porém dependente de subjetividade (DNIT, 2003).

Embora eficaz para avaliações preliminares e diagnósticos rápidos, a avaliação subjetiva tem limitações, como a variabilidade nas percepções dos avaliadores e a falta de precisão comparada a métodos instrumentais. Contudo, continua sendo uma ferramenta importante, principalmente quando se busca um levantamento rápido e de baixo custo, sendo complementada por métodos mais avançados em SGPs (Kogbara et al., 2016).

Para realizar a avaliação da condição dos pavimentos, o DNIT (2003b) estabelece diretrizes específicas para garantir a precisão e consistência do processo. Entre essas condições, destaca-se que os trechos avaliados não devem ultrapassar 2.000 metros de extensão e a avaliação deve ser realizada sob condições climáticas favoráveis, assegurando que fatores externos, como chuva ou vento forte, não interfiram nos resultados. A avaliação deve ser centrada exclusivamente no estado atual da superfície do pavimento, desconsiderando aspectos geométricos, como alinhamento e curvas, e também fatores que possam causar desconforto, como a presença de linhas férreas, pontes ou bueiros. Além disso, cada trecho deve ser analisado independentemente, sem comparações diretas entre diferentes trechos, para garantir um julgamento imparcial.

O levantamento da serventia, que se refere ao conforto e segurança ao rolamento, deve ser realizado periodicamente, já que a redução da serventia ao longo do tempo reflete a diminuição do desempenho do pavimento. Segundo Haas, Hudson e Zanieswski (1994), o desempenho de um pavimento é determinado pela interação entre o tempo e as condições de tráfego, e a variação da serventia ao longo do tempo é um dos principais indicadores dessa interação. Em outras palavras, a avaliação contínua e periódica da serventia e do impacto do tráfego é fundamental para o planejamento de intervenções e manutenção, permitindo que os gestores de pavimentos tomem decisões informadas sobre a preservação da infraestrutura rodoviária.

No contexto da avaliação subjetiva da condição dos pavimentos, um VSA igual a 5, que representaria condições perfeitas de rolamento, é extremamente raro de ser observado na prática. A AASHO (*American Association of State Highway Officials*) estabeleceu, na década de 1960, que os pavimentos flexíveis apresentavam uma

serventia média de 4,2, enquanto os pavimentos rígidos alcançavam 4,5. Esses valores indicam que, mesmo quando bem construídos, os pavimentos tendem a ter um VSA próximo de 5, mas esse valor diminui progressivamente com o aumento do tempo de uso e da intensidade do tráfego (DNIT, 2011). A deterioração do pavimento ao longo do tempo é, portanto, inevitável e um reflexo direto do desgaste causado pela ação do tráfego e pela exposição aos fatores climáticos.

De acordo com DNIT (2011), a figura representativa do VSA mostra uma linha tracejada superior, que marca o limite de aceitabilidade, ou seja, o valor mínimo de VSA em que os usuários ainda consideram as condições de rolamento aceitáveis. A linha inferior, por sua vez, define o limite de trafegabilidade, que indica o ponto em que a deterioração do pavimento se torna tão significativa que exige a reconstrução. AASHTO (1993) adota o VSA de 2,5 como o limite de aceitabilidade para vias com alto volume de tráfego, enquanto para vias com menor tráfego esse limite é de 2,0. A manutenção preventiva, portanto, deve ser priorizada antes que o pavimento atinja esses valores críticos, garantindo assim a prolongação da vida útil da via.

Devido ao alto custo envolvido nas metodologias de avaliação de pavimentos, as avaliações subjetivas são frequentemente vistas como uma alternativa viável para um levantamento inicial da condição dos pavimentos. Esses métodos, embora não tão precisos quanto as avaliações automáticas, permitem uma avaliação rápida e de baixo custo, sendo especialmente úteis quando os recursos financeiros para a manutenção das vias são limitados (DNIT, 2011). Além disso, a rapidez e a acessibilidade das avaliações subjetivas as tornam uma ferramenta eficaz para a identificação de problemas mais evidentes, podendo servir como base para uma avaliação mais detalhada e técnica posterior.

Em um estudo realizado por Shah et al. (2013a), vias de diferentes regiões da Índia foram avaliadas subjetivamente por um painel de avaliadores. Os participantes classificaram a condição dos pavimentos de acordo com o conforto ao rolamento. Os resultados confirmaram que a avaliação subjetiva pode ser uma ferramenta eficaz para o desenvolvimento de modelos que ajudem na análise do desempenho dos pavimentos. Similarmente, Pescador, Silva Junior e Fontenele (2018) compararam diversos métodos de avaliação da condição de pavimentos. Constatou-se que a avaliação subjetiva pode ser uma alternativa válida para gestores de pavimentos, pois, embora simples, ela pode produzir notas que se aproximam dos resultados obtidos

por métodos mais complexos e dispendiosos, garantindo uma análise rápida e de baixo custo.

A avaliação subjetiva da condição de pavimentos, embora útil e amplamente empregada, está sujeita a diversas fontes de viés que podem comprometer a precisão dos resultados. Fatores como a experiência prévia dos avaliadores, o estado habitual dos pavimentos que eles encontram e as condições climáticas no momento da avaliação influenciam diretamente a percepção dos avaliadores. Existem vários tipos de erros que podem ocorrer, como o erro de leniência, quando um avaliador atribui notas excessivamente altas ou baixas em relação à média do grupo; o erro de tendência central, no qual o avaliador se sente inclinado a atribuir notas medianas para evitar avaliações extremas; o efeito halo, em que a impressão geral de um pavimento influencia a avaliação de características específicas, e o erro de ancoragem, no qual o avaliador tende a usar as extremidades da escala de notas sem uma justificativa clara.

Para mitigar esses erros e aumentar a confiabilidade dos dados, diversas ferramentas têm sido desenvolvidas. Escalas visuais são um exemplo eficaz, compostas por imagens que ilustram diferentes condições de pavimento, com as respectivas notas atribuídas. Essas escalas servem como referência para os avaliadores, ajudando a padronizar as classificações e reduzir a variação nas notas atribuídas. Este tipo de ferramenta tem se mostrado uma solução valiosa para aumentar a consistência das avaliações subjetivas e minimizar o impacto dos fatores mencionados (Pereira, 2019; Pescador et al., 2018).

A escala visual é uma ferramenta essencial para aprimorar a avaliação subjetiva da condição de pavimentos, pois proporciona uma referência visual clara que auxilia os avaliadores na atribuição de notas. No estudo de Pereira (2019), foi validada uma escala visual ajustada que visa melhorar a precisão das avaliações, minimizando a dispersão entre os avaliadores. A pesquisa envolveu dois grupos: um recebeu apenas orientações básicas para a avaliação, enquanto ao outro foi fornecida a escala visual desenvolvida por Oliveira, Silva Junior e Fontenele (2013). Por meio da análise dos dados coletados, verificou-se que a escala inicial necessitava de ajustes, levando à criação da "Escala Visual Ajustada", que foi testada posteriormente (Pereira, 2019; Silva Junior; Fontenele, 2023). Isso sugere que a escala visual não apenas melhorou a precisão das avaliações, mas também contribuiu para uma maior consistência entre os avaliadores.

Pereira (2019) concluiu que a "Escala Visual Ajustada" pode ser uma ferramenta útil para aprimorar as avaliações subjetivas da condição dos pavimentos, oferecendo uma referência objetiva que minimiza as variáveis subjetivas e aumenta a confiabilidade dos resultados. Esse achado corrobora a importância das escalas visuais como um instrumento eficiente no contexto da avaliação de pavimentos, destacando seu papel na melhoria da acuracidade e na redução da variabilidade das notas atribuídas pelos avaliadores.

2.4 AVALIAÇÃO OBJETIVA

A avaliação objetiva da condição dos pavimentos é baseada no levantamento dos defeitos presentes na superfície, utilizando uma combinação de tipo, severidade e extensão dos defeitos para gerar uma pontuação, que permite classificar a condição geral do pavimento. Bertollo (1997) destaca a importância desse levantamento para o SGP, pois as informações obtidas ajudam a definir as estratégias de Manutenção e Reabilitação (M&R) necessárias. A identificação dos defeitos é essencial não só para determinar o estado atual da superfície, mas também para prever quando intervenções serão necessárias, evitando custos elevados em reparos emergenciais (Fontenele, 2001; Soncim, 2011).

Os defeitos podem surgir devido a falhas de projeto, execução ou esforços do tráfego, e sua manifestação pode ocorrer desde o início da operação da via até durante seu uso contínuo, como resultado do desgaste ou das intempéries (Soncim, 2011). A coleta de dados pode ser feita por meio de caminhadas sobre o pavimento ou usando veículos em movimento. O método de caminhada proporciona dados mais detalhados, porém demanda mais tempo e recursos (Fontenele, 2001; Soncim, 2011). Por outro lado, o levantamento com veículos permite a análise da malha viária em menor tempo, mas os dados podem ser menos precisos (Albuquerque, 2017; Pereira, 2019).

Para a realização da avaliação objetiva, devem ser realizados: o reconhecimento dos tipos de defeitos presentes; a mensuração da extensão dos defeitos; e a classificação da severidade dos defeitos, que pode ser alta, média ou baixa, dependendo do estágio de deterioração do pavimento (Páez, 2015). No entanto, os métodos de avaliação objetiva, embora bastante eficientes, enfrentam desafios na simplificação das técnicas para que possam ser aplicadas por

profissionais com capacitação mínima. Isso tem sido um foco de estudos recentes, buscando criar ferramentas mais acessíveis para avaliar a condição do pavimento de forma rápida e eficiente, como os índices de condição de pavimento (ICPs) (Viviani et al., 2010; Abu-Samra et al., 2017).

Para o desenvolvimento de um método de avaliação da condição de vias urbanas, Zanchetta (2017) utilizou como base o método do programa *Strategic Highway Research Program* - SHRP, que é amplamente reconhecido na literatura por sua abordagem simplificada para a identificação de defeitos em pavimentos.

Bertollo (1997) também recorreu ao manual SHRP para análises de priorização e modelos de desempenho, destacando sua aplicabilidade em estudos longitudinais de pavimentos. Esse método, que já foi amplamente adotado e validado, também se mostra eficaz nas análises de desempenho de pavimentos com grande volume de tráfego (Palma, 2019; Salviatto, 2020). Os manuais SHRP e normas que definem ICPs, como DNIT 006-2003 e ASTM D6433-2024, são utilizados para padronizar a classificação dos defeitos, com o objetivo de garantir consistência nas avaliações objetivas e subjetivas (Merlo et al., 2019).

Na pesquisa de Merlo et al. (2019), os autores avaliaram a evolução dos defeitos em pavimentos no campus da UEL entre os anos de 2015 e 2017, utilizando os procedimentos do PCI. Os resultados mostraram uma prevalência de defeitos como trincas por fadiga, longitudinal e transversal, além de remendos e desintegração. Em 2017, observou-se que os defeitos aumentaram em severidade, especialmente em áreas de maior circulação de ônibus, com destaque para o surgimento de trilhas de roda nas paradas. Merlo et al. (2019) concluíram que a recorrência desses defeitos nas áreas de maior exposição ao tráfego de ônibus foi um indicativo claro de que o impacto do transporte coletivo por ônibus é determinante para a degradação do pavimento. Esses resultados corroboram com as observações de Bertollo (1997), que também discutiu como o tráfego repetido afeta a durabilidade de pavimentos urbanos em ambientes de tráfego pesado.

Com relação ao impacto do tráfego de transporte coletivo por ônibus, Palma (2019) realizou uma análise detalhada na malha viária do campus da Universidade Estadual de Londrina (UEL), empregando tanto métodos subjetivos quanto objetivos de avaliação. A pesquisa também seguiu os procedimentos do PCI e verificou que, em vias com tráfego intenso de ônibus, foram identificadas maiores extensões de trincas longitudinais e transversais, além de outras formas de outros defeitos, como

buracos e remendos. Esses defeitos foram mais pronunciados em seções de pavimento impactadas pelo transporte coletivo por ônibus, corroborando os achados de Merlo et al. (2019), que também observaram o agravamento de defeitos em pavimentos devido à ação dos ônibus.

A análise de Salviatto (2020) sobre os efeitos do tráfego de veículos pesados reforça a importância de se considerar o impacto dos veículos pesados nas condições de pavimento, especialmente nas áreas de paradas e nas regiões de maior concentração de tráfego. A conclusão de Palma (2019) e Merlo et al. (2019) e Salviatto (2020) é que a presença do transporte coletivo por ônibus é um fator crucial para o agravamento das condições dos pavimentos urbanos.

No entanto, de acordo com outros Zanchetta (2017) e Merlo et al. (2019), embora o PCI seja amplamente utilizado, ele não é isento de limitações. Zanchetta (2017) acrescenta que muitos defeitos específicos de áreas urbanas, como os causados por tráfego intenso ou pela presença de sistemas de infraestrutura urbana, como redes de esgoto e drenagem, não são abordados de forma detalhada pelos métodos internacionais como o PCI. Merlo et al. (2019) também apontam que os defeitos relacionados à interação de pavimentos urbanos com condições climáticas e de tráfego, como buracos causados por falhas de drenagem, são muitas vezes negligenciados, sendo importante considerar esses aspectos para uma avaliação mais precisa.

Salviatto (2020) complementa essa crítica ao PCI, sugerindo que o modelo de avaliação poderia ser aprimorado para incluir defeitos específicos de pavimentos urbanos que não são abordados por métodos convencionais. Ele propõe, assim, a incorporação de metodologias mais modernas e ferramentas tecnológicas, como sensores para mapeamento de defeitos, que poderiam capturar de maneira mais eficiente e detalhada os defeitos típicos de áreas urbanas, além de oferecer um diagnóstico mais preciso e adequado para as condições específicas desses pavimentos.

A fotogrametria, uma técnica de levantamento geoespacial que utiliza imagens capturadas por câmeras aéreas ou satélites para medir e mapear áreas e objetos, tem sido cada vez mais incorporada ao campo da avaliação de pavimentos, oferecendo uma alternativa eficiente e precisa para a análise da condição de superfícies viárias. Quando associada aos métodos de avaliação objetiva e subjetiva, como o PCI, a

fotogrametria pode aprimorar a precisão do levantamento de defeitos e garantir uma análise mais detalhada.

A fotogrametria possibilita a coleta de dados sobre a superfície do pavimento sem a necessidade de inspeção direta no local, o que a torna uma ferramenta extremamente útil, especialmente em áreas de difícil acesso ou quando a coleta de dados em campo é logisticamente desafiadora. Salviatto (2020) propôs o uso de técnicas de sensores, que podem ser complementadas pela fotogrametria, para melhorar a captura de informações sobre defeitos, oferecendo um diagnóstico mais completo. Isso está em linha com os trabalhos de Merlo et al. (2019), que observam a evolução dos defeitos com o tempo, usando métodos como o PCI, mas também reconhecem as limitações desses métodos quando se trata de capturar dados mais precisos, os quais podem ser superados pela fotogrametria.

Zanchetta (2017) também destaca a importância de novas abordagens tecnológicas, como a fotogrametria, para capturar dados sobre defeitos de pavimentos urbanos que, muitas vezes, não são adequadamente registrados pelos métodos tradicionais de avaliação. Ao integrar essas tecnologias, é possível não só realizar um mapeamento mais preciso da extensão e severidade dos defeitos, mas também automatizar o processo de coleta e análise, o que resulta em uma economia de tempo e recursos para os gestores de pavimentos.

Além disso, a fotogrametria permite a análise de grandes áreas de pavimento de forma contínua, o que é uma vantagem em relação aos métodos tradicionais de levantamento, como os feitos por caminhadas ou veículos, que são mais limitados em termos de área coberta por unidade de tempo (Fontenele, 2001; Soncim, 2011). Essa capacidade de cobrir grandes áreas, com alta resolução e precisão, torna a fotogrametria uma ferramenta complementar fundamental para os métodos de avaliação da condição de pavimentos, potencializando a acuracidade das análises feitas com o PCI ou outras abordagens de avaliação objetiva.

2.5 FOTOGRAMETRIA APLICADA A AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS

Os SGPs na década de 1960 eram baseados em avaliações manuais, em que a condição do pavimento era determinada por inspeções visuais. Porém, com o aumento das exigências de precisão e com a introdução da facilitação do uso da

computação nos anos 1980, esses sistemas passaram a incorporar modelagem matemática, estatísticas e algoritmos para prever a deterioração dos pavimentos e otimizar as estratégias de manutenção. Dos modelos tradicionais tem-se o de coleta de dados sobre o estado do pavimento, como trincas, buracos e desgaste da superfície, seguidos de análises para determinar a prioridade das reparações.

Com o avanço da IA e Aprendizado de Máquina, o uso de SGP torna-se aprimorado. Conforme pesquisa de Ferreira, Correia e Tamagusko, (2024), integram novas tecnologias, como sensores automáticos e fotogrametria, que permitem uma coleta de dados mais precisa e menos sujeita a erros humanos. O uso de algoritmos de aprendizado de máquina, como redes neurais convolucionais (CNN), está se tornando cada vez mais comum para analisar imagens de pavimentos e detectar defeitos como fissuras e trincas, aumentando a precisão das avaliações (Wang e Baliello, 2024). Esses sistemas são mais eficazes em prever a vida útil dos pavimentos e sugerir intervenções de manutenção de forma mais dinâmica e baseada em dados reais, em vez de métodos tradicionais, com maior foco em otimização de custos e eficiência (Ferreira, 2024). O trabalho de Tamagusko (2024) discute a integração de técnicas de aprendizado de máquina nos SGP, abordando como esses métodos avançados podem superar as limitações dos sistemas convencionais, melhorando a coleta de dados, a previsão de desempenho e a tomada de decisões em relação à manutenção e a reabilitação dos pavimentos.

Assim, a necessidade de trabalhos mais robustos e adaptáveis às necessidades rodoviárias modernas, com foco na sustentabilidade e no aumento da durabilidade das redes viárias traz importância ao vínculo tecnológico empregado.

Técnicas como redes neurais convolucionais (CNNs) têm sido aplicadas para identificar, classificar os defeitos do pavimento, como trincas e buracos, com uma precisão superior aos métodos tradicionais. Além disso, o uso de VANTs têm sido empregados para a captura de imagens de alta resolução e para realizar a inspeção de pavimentos de maneira mais eficiente, economizando tempo e recursos. Esse avanço tecnológico tem permitido aos SGP a integração de algoritmos de análise preditiva que, além de melhorar a detecção de defeitos, são capazes de prever o desempenho futuro dos pavimentos sob diferentes condições operacionais e climáticas, fornecendo uma visão mais detalhada sobre a necessidade de intervenções. A integração de sensores IoT (Internet das Coisas) também tem se mostrado essencial, pois possibilita o monitoramento contínuo das condições do

pavimento, proporcionando dados em tempo real que alimentam os modelos preditivos (Waddell e Wiggins, 2022). Mostrando assim, que os modelos modernos que se utilizam de ferramentas tecnológicas, podem ser sistemas dinâmicos de gestão de infraestrutura, que integram dados históricos, atuais e preditivos para otimizar os custos de manutenção e garantir a longevidade da infraestrutura viária. A transição de métodos manuais e quantitativos para sistemas baseados em IA e *big data* representa um avanço considerável na engenharia civil, com um impacto direto na sustentabilidade e na eficiência dos processos de manutenção de pavimentos rodoviários (Huang et al., 2023).

A avaliação da superfície de pavimentos e sua relação com a segurança viária tem sido objeto de diversos estudos, especialmente no que se refere à textura da superfície e ao atrito. A fotogrametria, como técnica para capturar e analisar essas características, tem se mostrado uma ferramenta promissora. A pesquisa de Shalaby e Gendy (2012), por exemplo, utilizou um sistema de estereofotometria para investigar a macro textura da superfície do pavimento, destacando a influência dessa característica na resistência ao deslizamento e, conseqüentemente, na segurança do tráfego. A macro textura da superfície do pavimento tem um impacto direto no comportamento do veículo, especialmente em condições de clima adverso, como chuva, onde a capacidade de drenagem e a aderência são cruciais para evitar acidentes (Shalaby & Gendy, 2012).

Chen et al. (2019) propuseram o uso de um sistema automático de fotogrametria de curto alcance (ACRP) para medir e monitorar em tempo real a textura da superfície do pavimento. Esse sistema permite uma avaliação contínua e precisa, proporcionando dados imediatos que são cruciais para a gestão de pavimentos urbanos e rodoviários. A possibilidade de monitorar a textura de forma dinâmica facilita a identificação precoce de áreas que necessitam de reparos, além de otimizar a manutenção preventiva, um aspecto essencial para garantir a segurança a longo prazo das infraestruturas viárias (Chen et al., 2019).

A técnica de fotogrametria também foi explorada por Al-Assi et al. (2020), que integraram a avaliação da macro textura e microtextura dos pavimentos a um modelo de atrito de Persson. Este modelo, ao prever a resistência ao deslizamento, contribui para a formulação de estratégias de manutenção e projeto de pavimentos mais seguros. A microtextura, em particular, tem um impacto significativo nas propriedades de atrito do pavimento, especialmente sob condições de alta umidade, onde a

aderência é crucial para a segurança dos motoristas. A integração de modelos matemáticos e fotogrametria possibilita uma avaliação mais abrangente e precisa da superfície dos pavimentos, fornecendo informações detalhadas que são fundamentais para a tomada de decisões em engenharia de pavimentos (Al-Assi et al., 2020).

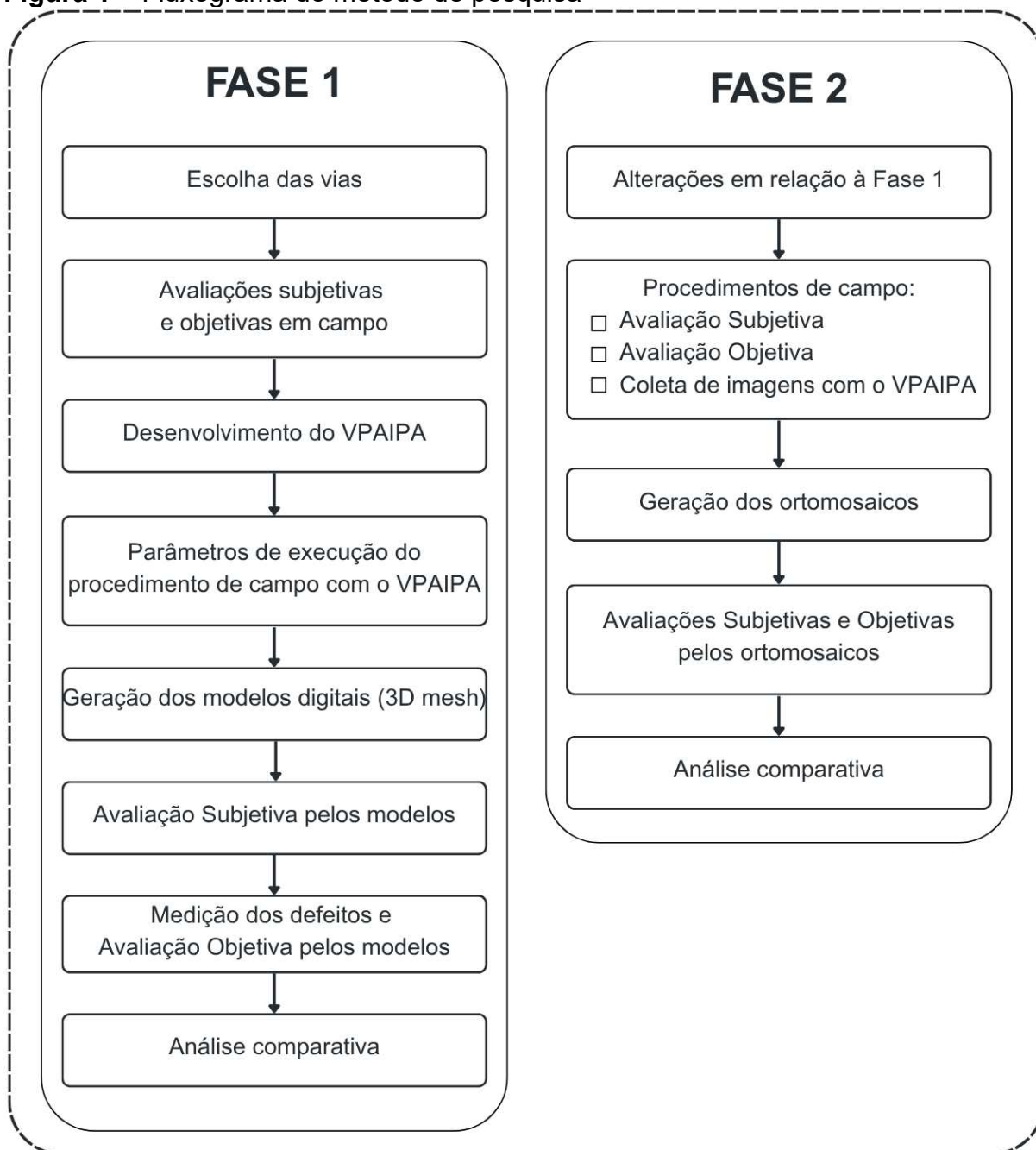
Esses estudos demonstram a relevância da fotogrametria na análise das características da superfície do pavimento e reforçam sua utilidade como ferramenta de monitoramento contínuo e preciso. A relação entre textura de pavimento e segurança viária, abordada por essas pesquisas, sublinha a importância de técnicas modernas e automatizadas para a avaliação e manutenção das infraestruturas rodoviárias, com implicações diretas para a melhoria da mobilidade e redução de acidentes no trânsito.

Eisenbach et al. (2020) apresentam uma metodologia detalhada para preparar a detecção de defeitos em pavimentos utilizando aprendizado profundo. O foco principal dos autores está na preparação dos dados e nos processos de pré-processamento, essenciais para garantir a eficácia dos modelos de aprendizado de máquina. Esses modelos devem ser capazes de identificar defeitos com precisão a partir de imagens e dados sensoriais. O estudo apresenta como contribuição a identificação de desafios cruciais na preparação dos dados, incluindo a rotulagem correta, a extração de características e o aumento de dados. A rotulagem precisa é destacada como fundamental, pois rótulos incorretos podem prejudicar seriamente o desempenho do modelo. Além disso, os autores ressaltam a importância da capacidade de generalização dos modelos para diferentes tipos de pavimento e condições ambientais, o que exige uma abordagem robusta no preparo dos dados. Os autores ainda destacam a necessidade de conjuntos de dados de alta qualidade e bem rotulados, que são fundamentais para o treinamento de modelos eficazes, eles enfatizam que uma curadoria cuidadosa dos dados é tão importante quanto a escolha da arquitetura de rede. A implementação de pré-processamento automatizado e o uso de múltiplos tipos de dados sensoriais, como imagens ópticas, infravermelhas e acústicas, são discutidos como formas de melhorar a detecção dos defeitos em pavimentos, fornecendo uma abordagem mais holística e eficaz.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordados os procedimentos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. Na Figura 1 é apresentado o fluxograma do método de pesquisa detalhando as duas fases do processo adotado.

Figura 1 – Fluxograma do método de pesquisa



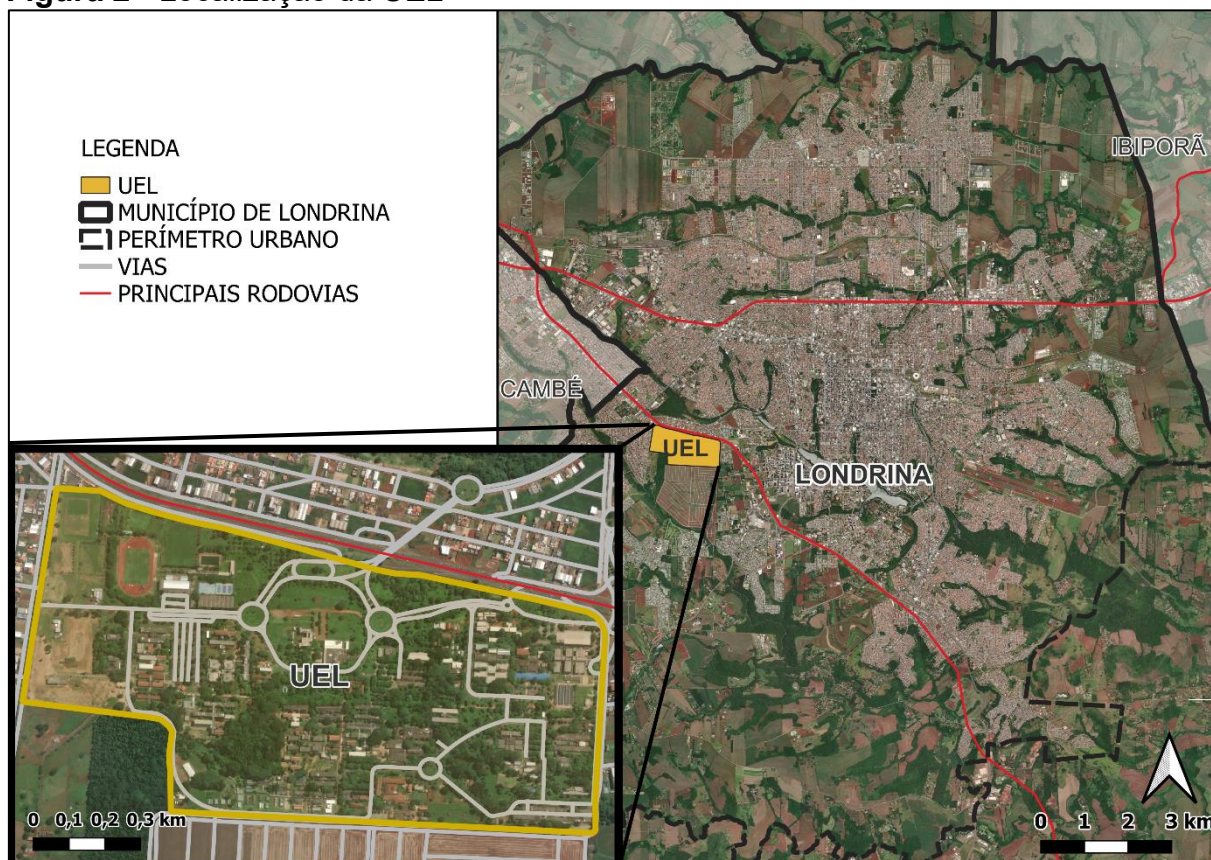
A Fase 1 contempla a fase inicial da pesquisa, composta pela construção do equipamento para a coleta das imagens, denominado aqui de VPAIPA e pelo teste

piloto que deu base para a criação do Procedimento de Aquisição de Imagens do Pavimento e Avaliação Semiautomatizada de Defeitos (PAIPA). Já, a Fase 2 compreende a aplicação em escala do PAIPA.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

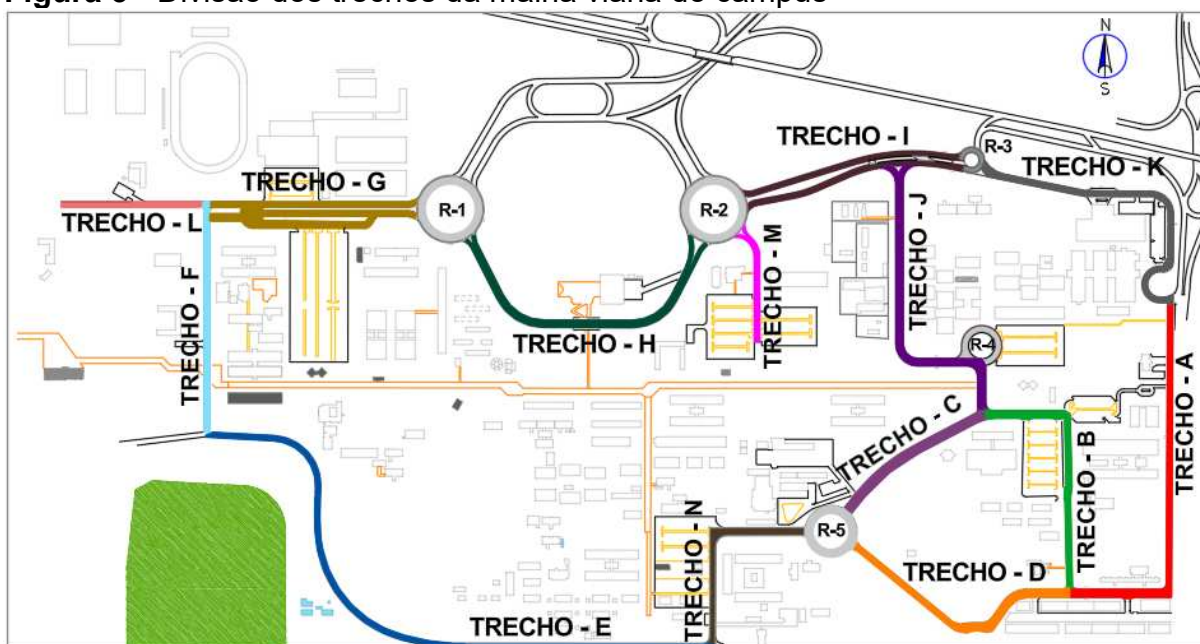
O local escolhido para o desenvolvimento desta pesquisa foi o campus sede da Universidade Estadual de Londrina (UEL), localizado na área urbana da cidade de Londrina-PR, como mostrado na Figura 2. O campus possui aproximadamente 1,5 km² por onde circulam, diariamente, cerca de 25 mil pessoas.

Figura 2 - Localização da UEL



Em pesquisa desenvolvida por Ignacio et. al (2018) a malha viária do campus foi dividida em 19 trechos, como visto na Figura 3. Esta divisão foi mantida nesta pesquisa.

Figura 3 - Divisão dos trechos da malha viária do campus



Cada trecho foi subdividido em seções menores, denominadas unidades amostrais (UAs). O dimensionamento dessas unidades seguiu as diretrizes estabelecidas pela norma ASTM (2024), adotando larguras fixas correspondentes às faixas de tráfego e comprimentos variáveis, cujas áreas variam de 135 m² a 315 m², conforme as exigências metodológicas.

A priori, tendo como objetivo o teste do método de pesquisa proposto, selecionou-se uma unidade piloto - UA 144, situada no trecho C. Esta unidade apresenta largura de 4,1 m e comprimento de 71,9 m. A escolha da UA 144 possibilitou a realização de testes preliminares e a implementação de ajustes metodológicos indispensáveis à aplicação do procedimento em escala ampliada.

Após esta fase de testes preliminares, o método foi aplicado nos trechos B, C, J, K e M, totalizando 47 unidades amostrais avaliadas.

No sistema viário do campus da UEL é possível verificar a circulação de veículos não motorizados e de baixo impacto, automóveis, motocicletas, ônibus e vans, caminhões de serviço, entre outros. Além disso, circulam pelas vias da UEL diversas linhas do transporte público coletivo urbano e metropolitano de ônibus urbanos e interurbanos. Estas linhas possibilitam conectar a Universidade a diversas regiões de Londrina (terminal central, terminais Acapulco, Catuaí e Vivi Xavier, por exemplo) e cidades conurbadas como Cambé a oeste e Ibiporã a leste. Na Tabela 1 estão listadas as linhas que transitam pelos trechos de estudo.

Tabela 1 – Linhas de transporte público que circulam pelos trechos de estudo

TRECHO	LINHA	SENTIDO	EMPRESA	FREQUÊNCIA
C	306	Cidade Universitária	Grande Londrina	46
	932	Terminal Vivi Xavier - UEL	Grande Londrina	10
J	306	Cidade Universitária	Grande Londrina	46
	932	Terminal Vivi Xavier - UEL	Grande Londrina	10
K	1907a	Cambé - Terminal Catuaí (Ana Rosa)	TIL	43
	1907b	Cambé - Terminal Catuaí (Santo. Amaro)	TIL	7
	1920	Ibiporã - Terminal Catuaí	TIL	22
	305	UEL - Terminal Central	Grande Londrina	41
	307	Avelino Vieira - Terminal Central HC	Grande Londrina	96
	315a	Columbia	Grande Londrina	35
	904a	Terminal Vivi Xavier - Terminal Acapulco (Via Bandei)	Grande Londrina	17
	904b	Terminal Vivi Xavier - Terminal Acapulco (Via Arthur Thomas)	Grande Londrina	63
	913b	Terminal Catuaí - UEL	CMTU	7
M	NENHUMA			

Sendo assim, a expressiva movimentação de pedestres, veículos leves e pesados, observada na UEL, reproduz a dinâmica funcional típica de uma cidade de pequeno porte, evidenciando sua característica de grande polo gerador de tráfego.

3.2 FASE 1 – AVALIAÇÕES SUBJETIVA E OBJETIVA

Para a investigação da condição superficial do pavimento nos segmentos selecionados do campus da Universidade Estadual de Londrina (UEL) foram realizadas as avaliações subjetiva e objetiva.

Os levantamentos de campo foram executados *in loco*, preferencialmente durante as manhãs de domingo e feriados, com objetivo de minimizar as interferências decorrentes do fluxo veicular e garantindo condições de segurança aos avaliadores.

A avaliação subjetiva seguiu a norma DNIT 009/2003 PRO, porém, para atender aos objetivos da pesquisa, foram feitas duas adaptações no método. A primeira diz respeito sobre a realização da avaliação em campo que, para esta pesquisa, foi feita por meio de caminhada sobre o trecho em estudo. A segunda adaptação foi em relação à indicação dos valores de Serventia Atual (VSA), que, nesta pesquisa, optou-se pela escala de 0 a 100 (zero a cem) pontos, em que zero representava a condição péssima e 100 a condição excelente, para se manter a escala

de pontuação usada na avaliação objetiva pelo método do *Paviment Condition Index (PCI)*. A escala utilizada segue apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Escala para pontuação das avaliações subjetiva e objetiva

100	Excelente
85	Muito boa
70	Boa
55	Regular
40	Ruim
25	Muito ruim
10	Péssima
0	

Fonte: adaptado de ASTM (2024)

Para a realização da avaliação subjetiva, foram selecionados cinco avaliadores que tinham conhecimento prévio da norma empregada na avaliação. Estes avaliadores percorreram a pé cada UA, registrando, em formulários individuais, a nota atribuída a cada UA durante a caminhada era atribuída com base no desconforto correspondente à percepção estimada para o deslocamento em carro.

Ressalta-se que as UAs foram avaliadas de forma independente, sem que a pontuação de uma unidade influenciasse a atribuição de nota às subsequentes. Adicionalmente, foi orientado que os avaliadores não interagissem entre si durante o processo de avaliação, a fim de evitar qualquer tipo de influência mútua que pudesse comprometer a imparcialidade dos resultados.

Já a avaliação objetiva consistiu na inspeção dos defeitos na superfície do pavimento de cada UA, empregando o método PCI, conforme especificado na norma ASTM (2024). Foram realizadas duas avaliações objetivas no mesmo trecho em estudo em datas distintas. Na primeira, foi realizada a avaliação anotando o somatório das medições por defeito e severidade, denominada de L01_{obj}. A segunda avaliação foi executada anotando-se em um croqui a posição aproximada de cada defeito, assim como a medição e a severidade. Esse segundo levantamento foi denominado de

L02_{obj} e foi elaborado a fim de se comparar a medição exata de cada defeito *in loco* e nos modelos digitais.

3.3 FASE 1 - DESENVOLVIMENTO DO VPAIPA

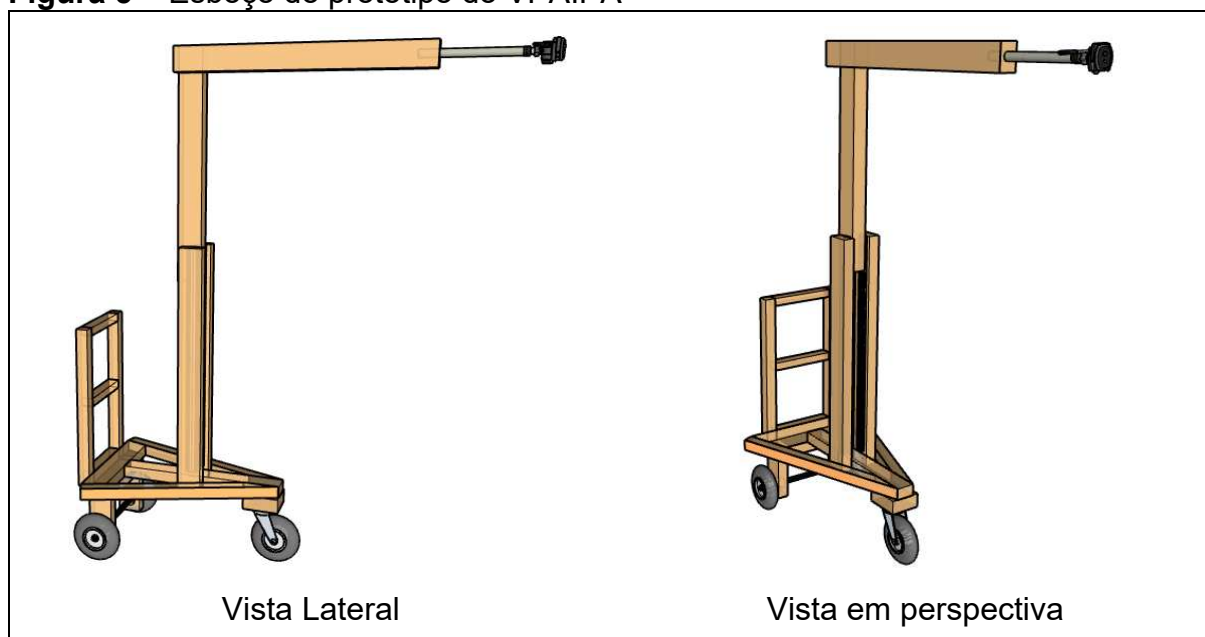
Para iniciar a elaboração do protótipo do VPAIPA, foram elencadas algumas questões que deveriam ser consideradas, tais como:

- i) a presença de itens suspensos, como arborização, rede elétrica e sinalizações verticais de trânsito que se sobrepõem ao pavimento, bem como o sombreamento destes e outros elementos;
- ii) a necessidade de manter a altura e o alinhamento constante da câmera em relação ao pavimento;
- iii) a capacidade da bateria da câmera e de armazenamento de imagens e
- iv) a capacidade de ser um equipamento leve o suficiente para ser guiado por tração humana garantindo a sua estabilidade.

Assim montou-se um esboço do protótipo no programa *Sketchup Pro* (versão 21.0.391) como apresentado na Figura 5.

Pelo esboço, foi prevista a construção de um triciclo totalmente desmontável para facilitar seu transporte até o local de pesquisa. Na barra superior, em balanço, foi prevista a instalação de um suporte no qual é possível acoplar uma câmera

Figura 5 – Esboço do protótipo do VPAIPA



Na Tabela 2, são descritos e quantificados os itens utilizados para a construção do VPAIPA.

Tabela 2 – Quantificação dos itens do VPAIPA

ITEM	Quantidade
Prego	4 un
Parafuso de madeira (tamanhos diversos)	100 un
Parafuso francês (3/16" x 1.1/2) + Porca borboleta 3/16"	6 un
Parafuso francês 1/4" x 3.1/2"	12 un
Porca borboleta 1/4"	12 un
Arruela	16 un
Cantoneira L	6 un
Rodizio Giratório 8x2 Pneumático Cargo 2.50x4	1 un
Barra rosca 1/2" (para eixo rodas traseiras)	1 un
Roda Ajax Cargo - 2.50x4 - 4 lonas - furo passante 3/4"	2 un
Porca sextavada 3/4" + arruela	2 un
Encaixe para câmera	1 un

Alguns dos elementos utilizados para a construção do VPAIPA estão expostos na Figura 6, tais como caibros de madeira, encaixe para câmera e rodas.

Figura 6 – Itens utilizados para a construção do VPAIPA



Além da construção do VPAIPA, foi necessário estabelecer os procedimentos de campo, que estão descritos no próximo item.

3.4 FASE 1 - PARÂMETROS E EXECUÇÃO DO PROCEDIMENTO DE CAMPO

A aquisição destas imagens digitais foi realizada com uma câmera *GoPro Hero 9*. No teste piloto realizado na UA 144, as capturas de imagens foram coletadas de duas formas: por meio de fotos e por meio de vídeos. Para as demais unidades, foram feitas apenas gravações de vídeo. As especificações da câmera que foi utilizada estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Especificações da câmera

Característica	Especificação
Resolução da foto	5184 x 3888 pixels
Abertura focal	f/2.5
Tempo de exposição	1/120 s
Formato do arquivo de foto	JPG
Resolução de gravação	1920 x 1080 pixels
Quadros por segundo	60
Formato do arquivo de gravação	MP4

A câmera *GoPro Hero 9* permite a utilização do modo estreito, que foi utilizado nesta pesquisa para diminuir as distorções nas bordas da imagem. No formato estreito, a área de abrangência da foto foi de aproximadamente 2,6 m x 1,9 m.

Conhecendo a área de abrangência da câmera, a resolução das imagens – de foto e vídeo – e a altura da câmera no VAPAIP, pode-se definir o GDS (Ground Sample Distance) utilizando a equação 1.

$$GSD = \frac{H \times tam_sensor}{f} \quad (1)$$

Onde:

GSD = Ground Sample Distance (em metros ou centímetros/pixel)

H = Altura de voo em relação ao solo (em metros)

f = Distância focal da câmera (em milímetros)

Tam_sensor = dimensão física de um pixel (em milímetros)

Assim, para os modelos gerados a partir de fotografias, o GSD calculado foi de aproximadamente 0,50 mm/pixel, considerando a média entre os eixos horizontal e vertical.

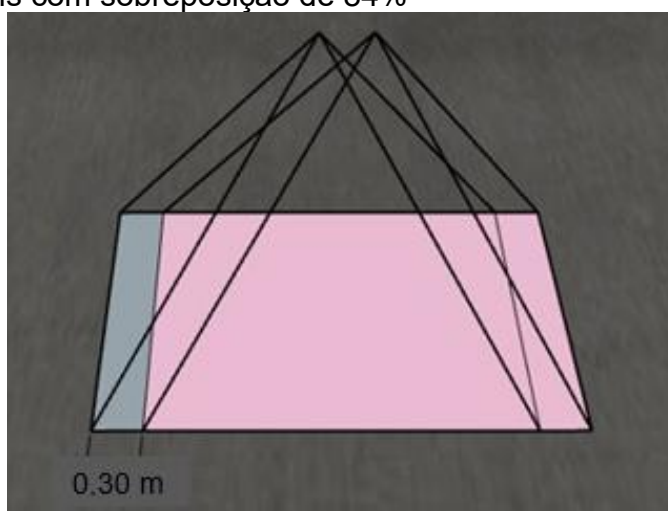
Para os modelos gerados a partir de frames extraídos de vídeos, o GSD obtido foi de aproximadamente 1,5 mm/pixel. Esse valor indica uma resolução espacial inferior à obtida com as imagens fotográficas, o que era esperado, uma vez que os vídeos foram gravados com resolução mais baixa em comparação às fotos estáticas. Essa escolha se deveu à limitação de capacidade de armazenamento do cartão de memória utilizado durante a aquisição dos dados.

Para iniciar o procedimento de campo, foi necessário definir a área de abrangência da imagem para então ser possível calcular a distância longitudinal e lateral de cada captura e garantir a sobreposição de imagens.

Para fotos capturadas na orientação nadir (câmera voltada para o pavimento), a literatura sugere sobreposição mínima de 70% longitudinal e de 60% entre fotos de linhas diferentes. Como nesta pesquisa não se utilizou pontos de controle georreferenciados, além das imagens terem sido capturadas com a câmera apenas na posição nadir, então, foram selecionados valores de sobreposições ao menos 10% superiores aos indicados.

Desta forma, para o registro das fotos, visando garantir a sobreposição longitudinal, capturou-se uma foto a cada 0,3 m (Figura 7), obtendo-se 84% de sobreposição. A distância de 0,35 m já garantiria cobertura de 80%, porém, a medição foi realizada com um odômetro manual que não possui tal precisão. Vale ressaltar que este critério não interfere nos vídeos.

Figura 7 – Imagens com sobreposição de 84%



Já para a sobreposição lateral, optou-se por marcar uma linha de passagem a cada 0,7 m garantindo sobreposição de 73%. A primeira linha de passagem foi marcada a 50 cm do final da linha de estacionamentos e como o trecho analisado possuía 3,8 m de largura, foram demarcadas 5 linhas de passagem. O início, o meio e o final de cada linha de passagem foram medidos com trena a partir do final da linha de estacionamento e demarcados no pavimento com giz, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Marcação no pavimento das 5 linhas de passagem.



Cada linha de passagem foi denominada por um número (1 a 5) seguido de uma letra, A para os pontos de início, B para o meio e C para o final.

3.5 FASE 1 - GERAÇÃO DOS MODELOS DIGITAIS (3D MESH)

Os processos de aerotriangulação, ortorretificação e geração dos modelos digitais do trecho em estudo, foram realizados no *software iTwin Capture Modeler 2023* da *Bentley® Systems* versão 23.0.1.2693 (versão educacional).

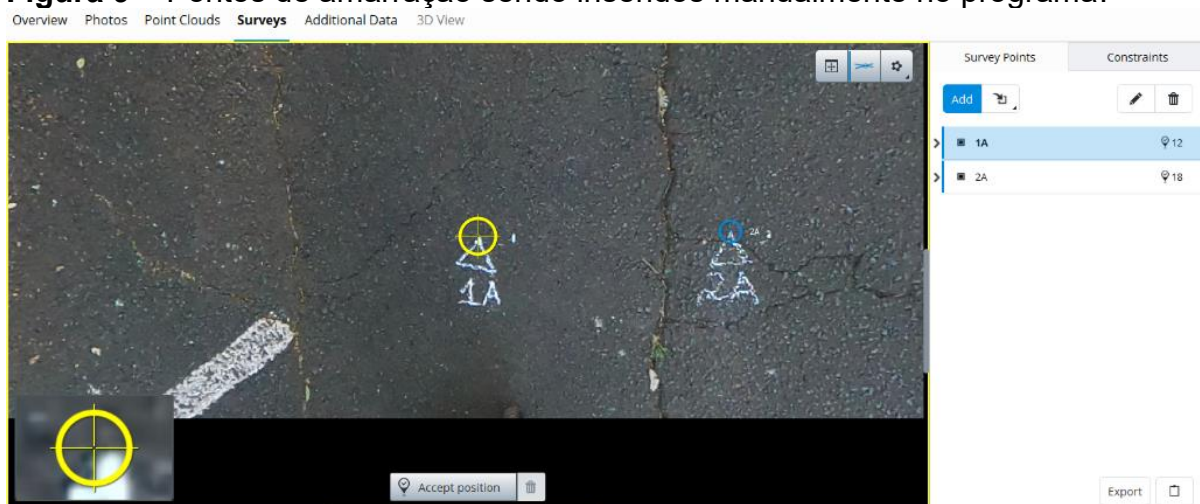
A fim de avaliar a possibilidade de se realizar o levantamento sem a necessidade de georreferenciamento prévio, nesta pesquisa não foram utilizados pontos de controle com coordenadas conhecidas. Assim, foram adicionados apenas pontos de amarração (*tie points*), isso porque, o *software* utilizado para geração dos modelos 3D permite a localização manual de pontos em comum em mais de uma foto

e ainda permite que se insira condições de contorno (*survey constraints*) às quais o *software* deverá atender ajustando o modelo gerado.

Então, optou-se por utilizar um par de pontos como pontos de amarrações que, por terem distância previamente conhecida, foram utilizadas como restrições de escala (*scale constraints*). Como durante o levantamento foram marcados no trecho os pontos de início, meio e fim de cada linha de passagem do VPAIPA, aproveitou-se para utilizar essas próprias marcações como pontos de amarração.

Para isso, no programa foram escolhidas ao menos duas fotos que apareciam cada uma das marcações 1A e/ou 2A e demarcadas manualmente como pontos de amarração no programa (Figura 9). Posteriormente, na aba destinada à inserção das condições de contorno (aba *Constraints*) foi escolhida a opção que permite restringir a escala entre dois pontos. Especificamente, selecionou-se os pontos 1A e 2A e definiu-se a distância entre eles como sendo de 0,7 metros. Essa restrição garante que a distância entre esses dois pontos seja mantida constante durante a geração dos modelos digitais.

Figura 9 – Pontos de amarração sendo inseridos manualmente no programa.



Estes atributos, pontos de amarração e restrições de escala, foram inseridos tanto para os modelos gerados a partir de fotos, quando para os modelos a partir de vídeos. Porém, a entrada de dados para a geração de modelos a partir de fotos se difere dos dados de entrada para a geração de modelos a partir de vídeos.

A seguir são descritos os parâmetros utilizados para o modelo gerado a partir de fotos e na sequência descrições acerca dos parâmetros utilizados para o modelo gerado a partir de vídeos.

3.5.1 Modelo gerado a partir de fotos

A partir das fotografias obtidas foram gerados dois modelos tridimensionais do mesmo trecho em estudo. Após o primeiro levantamento de campo notou-se a necessidade de comparar cada defeito encontrado no modelo par a par com os defeitos encontrados *in loco*. Como já havia se passado alguns dias do primeiro levantamento, optou-se por refazer tanto o levantamento *in loco* quanto um novo modelo digital. Assim, para cada um dos modelos, foi gerado um banco de imagens do pavimento, e ambos os registros foram realizados com a câmera *GoPro Hero 9* conforme explicitado no item 3.2, referente à etapa 2. Esses modelos provenientes das fotografias (F) foram denominados por modelos F01 e F02, respectivamente.

Nos parâmetros de processamento da aerotriangulação, o *software* utilizado possibilita dois tipos de ajustes:

- a) Restrições de ajustes (*Adjustment constraints*): neste item é possível escolher entre utilizar pontos de controle, metadados de posicionamento das fotos, nuvem de pontos importada ou ainda, não utilizar nenhuma das três opções e permitir que o *software* faça os ajustes apenas com a localização automatizada de pontos de amarração.
- b) Rígida manutenção da medição final (*Final rigid registration*): neste item é possível optar por utilizar a condição de contorno dos pontos de amarração inseridos, os pontos de controles importados, e os metadados de posicionamento das fotos ou nuvens de pontos importadas.

Como não foram utilizados pontos de controle georreferenciados, no item “Restrições de ajustes”, apenas as opções de utilização de metadados das fotos e de pontos de amarração estavam liberadas para utilização neste trabalho. Assim, neste item, para os modelos F01 e F02, não foram selecionadas nenhuma das opções, enquanto no item “Rígida manutenção da medição final” foi selecionada a opção de se utilizar as condições de contorno dos pontos de amarração inseridos.

Essas escolhas deram-se em função da possibilidade de geração de modelo digital sem a adição de informações de georreferenciamento, tendo como hipótese a realização de levantamento mais simplificado, sem a necessidade de utilização de câmeras com GPS integrado.

Uma vez estabelecidos os pontos de amarração, as restrições de escala e os parâmetros de processamento, foi iniciado o processo de aerotriangulação. Na sequência, foi realizado o processo de construção do modelo 3D. Uma vantagem deste *software* é que ele permite que o processamento seja feito em blocos (*tiling*), o que reduz a capacidade de memória RAM necessária do computador.

Neste trabalho, optou-se por utilizar sempre a opção que necessitava da menor capacidade de memória RAM. Assim, para os modelos F01 e F02, foi selecionada a opção de divisão retangular volumétrica, sendo necessário 13 GB de RAM e 11 GB de RAM respectivamente. Os demais parâmetros foram mantidos conforme o *default* do programa.

3.5.2 Modelo gerado a partir dos vídeos

Assim como os modelos provenientes das fotos, foram realizados dois levantamentos por vídeos do trecho em estudo com a câmera *GoPro Hero 9* de acordo com o item 3.2. referente à etapa 2. Esses modelos oriundos dos frames dos vídeos (V) foram denominados por modelo V01 e V02.

Cada um dos vídeos gerados por linha teve de seis a sete minutos de duração, considerando a menor duração de vídeo de cinco minutos (300 segundos), para que houvesse em média 0,3 m de distância entre cada *frame*. Como o trecho em estudo possui cerca de 70 metros de distância, optou-se por capturar um *frame* a cada 1,2 segundos, mantendo o padrão de distância do levantamento anterior, feito com as fotos.

Na etapa de aerotriangulação, foram adicionados os pontos de amarração, assim como realizado para a geração de modelos por fotos. Porém, os vídeos não agregam metadados a cada *frame*, então, diferentemente do processamento das fotos, na etapa de aerotriangulação, apenas a opção de utilizar as condições de contorno dos pontos de amarração ficou habilitada. Os demais parâmetros foram mantidos conforme *default* do programa.

3.6 FASE 1 – AVALIAÇÃO SUBJETIVA PELOS MODELOS

A avaliação subjetiva pelos modelos digitais foi realizada visando comparar os valores obtidos *in loco* com aqueles obtidos nos modelos. Tal comparação foi

realizada a fim de analisar a viabilidade do procedimento aqui proposto, o PAIPA, e dos modelos 3D gerados pelo *iTwin* para a avaliação dos defeitos de pavimentos urbanos.

A avaliação subjetiva pelos modelos digitais também foi baseada na norma DNIT 009/2003 PRO com a mesma adaptação na escala utilizada *in loco*.

Foram escolhidos avaliadores diferentes daqueles que fizeram a avaliação *in loco*, para que o conhecimento do trecho avaliado, não influenciasse na avaliação digital. Foram definidos dois grupos, um para avaliação do modelo F01 (gerado por fotos) e outro para avaliação do modelo V01 (gerado por vídeos). Ambos os grupos eram formados por dois professores da área de transportes, dois alunos de pós-graduação em engenharia urbana e um graduando no curso de engenharia civil, tais avaliações foram denominadas por F01_{subj} e V01_{subj}.

Para cada integrante dos grupos foi apresentado o modelo digital no programa *iTwin Capture Desktop Viewer* versão 2023.0.1.2693 (versão educacional). Para que a resolução da tela do computador não interferisse na avaliação, todos integrantes do grupo utilizaram o mesmo computador. Cada avaliador atribuiu uma nota do valor de serventia atual em ficha individual.

3.7 FASE 1 – MEDIÇÃO DOS DEFEITOS NO PAVIMENTO

A avaliação objetiva nos modelos F01_{obj} e V01_{obj} também se baseou no método do PCI (ASTM, 2024), porém, a medição dos defeitos foi conduzida utilizando o programa *iTwin Capture Manage and Extract* versão 24.1.0 (versão educacional), *Bentley® Systems*. Neste programa é possível inserir modelo 3D com ou sem georreferenciamento e permite gerar anotações e medições no modelo.

Para as avaliações F02_{obj} e V02_{obj} observou-se os croquis do levantamento L02_{obj} e então, localizou-se o mesmo defeito nos modelos e os valores foram comparados. Foi definida que a avaliação par a par ocorresse em segundo momento para que a identificação prévia dos defeitos nos croquis empregados na segunda avaliação não influenciasse na identificação dos defeitos e, conseqüentemente, no cálculo do PCI dos modelos F01_{obj} e V01_{obj}.

3.8 FASE 1 - COMPARAÇÃO DAS MEDIÇÕES

A fim de se comparar estatisticamente os grupos de defeitos encontrados *in loco* e nos modelos, aplicou-se o teste de normalidade. O teste de Shapiro-Wilk é indicado para grupos com menos de 50 amostras. Como apenas o grupo do defeito trinca transversal de severidade média possui mais que 50 amostras, este foi analisado pelo teste de Kolmogov-Smirnov. Todos os demais grupos puderam ter a normalidade analisada pelo teste Shapiro-Wilk.

Os testes de Normalidade, Kolmogov-Smirnov e Shapiro-Wilk, foram realizados com grau de confiança de 95% (nível de significância (α) de 5%), sendo que as hipóteses adotadas foram:

H_0 : os dados seguem uma distribuição normal.

H_1 : não se pode afirmar que os dados seguem uma distribuição normal.

A decisão sobre a rejeição ou não da hipótese nula foi baseada no p-valor obtido, com as seguintes considerações:

p-valor $>$ α : não se rejeita H_0

p-valor \leq α : rejeita-se H_0

Após verificada a distribuição dos dados, partiu-se para a aplicação dos testes comparativos. Para dados paramétricos, aplicou-se o teste t com amostras pareadas e para dados não paramétricos aplicou-se o teste de Wilcoxon. Para ambos, utilizou-se nível de significância (α) de 5% e as seguintes hipóteses:

H_0 : não há diferença estatisticamente significativa entre as medidas dos grupos analisados;

H_1 : existe diferença estatisticamente significativa entre as medidas dos grupos analisados.

A hipótese nula é rejeitada ou não conforme o p-valor:

p-valor $>$ α : não se rejeita H_0 e rejeita-se H_1

p-valor \leq α : rejeita-se H_0 e não se rejeita H_1

3.9 FASE 2

Algumas alterações foram necessárias para o desenvolvimento da Fase 2 entre elas estão:

- a forma de manutenção do alinhamento longitudinal (este tópico será discutido no item 4.3);
- a geração dos modelos digitais;
- a medição dos defeitos nos modelos digitais e
- a aplicação de novos testes estatísticos para uma análise comparativa mais densa.

3.9.1 Geração dos modelos digitais – ortomosaicos e medição dos defeitos

Na etapa anterior da pesquisa, optou-se pela geração de modelos digitais tridimensionais do tipo *3D mesh*, no formato *.3SM*, uma vez que esse formato é compatível com os softwares *iTwin Capture Manage and Extract*, utilizados para a detecção e quantificação de defeitos nas superfícies analisadas.

Entretanto, na Fase 2 do estudo, considerou-se a necessidade de ampliar a interoperabilidade dos arquivos gerados, a fim de possibilitar sua utilização em uma gama mais ampla de plataformas e aplicações analíticas. Dessa forma, optou-se pela produção de ortomosaicos no formato *.TIFF (Tagged Image File Format)*, amplamente reconhecido por sua alta qualidade de imagem e por ser compatível com diversos *softwares* de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e de processamento de imagem.

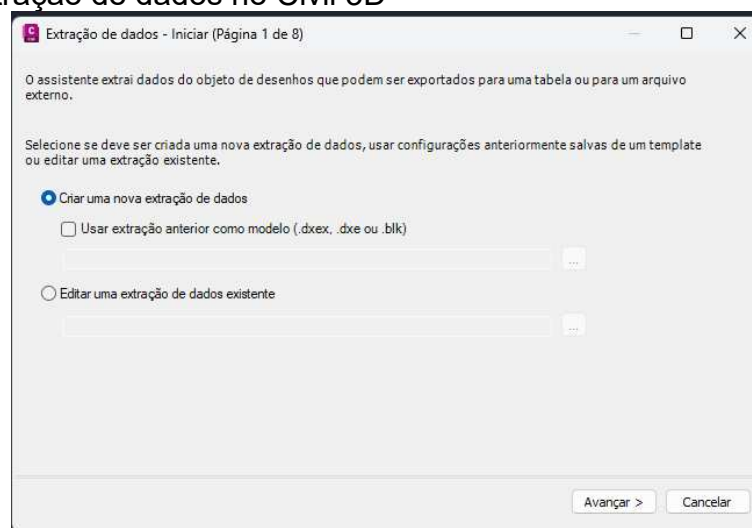
Com os arquivos *.TIFF* foi possível a medição dos defeitos do pavimento no *software Autodesk Civil 3D* (versão 13.7.1175.0 2025 – versão educacional) no qual definiu-se camadas para classificar os defeitos e suas severidades diferenciando-as por cores, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Camadas com cores diferenciando o tipo e a severidade dos defeitos comumente encontrados em vias urbanas

S..	Nome	Ati...	C.	B.	P..	Cor	Tipo de ...	Espessur...	Transp...	C.	Descrição
	00_Imagem					255	Contínu...	— Padr...	0		00_Imagem
	01_A_Fadiga_Alta					170	Contínu...	— Padr...	0		01_A_Fadiga_Alta
	01_B_Fadiga_Baixa					150	Contínu...	— Padr...	0		01_B_Fadiga_Baixa
	01_M_Fadiga_Media					130	Contínu...	— Padr...	0		01_M_Fadiga_Media
	10_A_Trinca_Alta					240	Contínu...	— Padr...	0		10_A_Trinca_Alta
	10_B_Trinca_Baixa					194	Contínu...	— Padr...	0		10_B_Trinca_Baixa
	10_M_Trinca_Media					ma...	Contínu...	— Padr...	0		10_M_Trinca_Media
	11_A_Remendo_Alta					126	Contínu...	— Padr...	0		11_A_Remendo_Alta
	11_B_Remendo_Baixa					110	Contínu...	— Padr...	0		11_B_Remendo_Baixa
	11_M_Remendo_Media					54	Contínu...	— Padr...	0		11_M_Remendo_Media
	13_A_Buraco_Alta					10	Contínu...	— Padr...	0		13_A_Buraco_Alta
	13_B_Buraco_Baixa					12	Contínu...	— Padr...	0		13_B_Buraco_Baixa
	13_M_Buraco_Media					24	Contínu...	— Padr...	0		13_M_Buraco_Media
	20_A_Desgaste_Alta					150	Contínu...	— Padr...	0		20_A_Desgaste_Alta
	20_B_Desgaste_Baixa					171	Contínu...	— Padr...	0		20_B_Desgaste_Baixa
	20_M_Desgaste_Media					181	Contínu...	— Padr...	0		20_M_Desgaste_Media

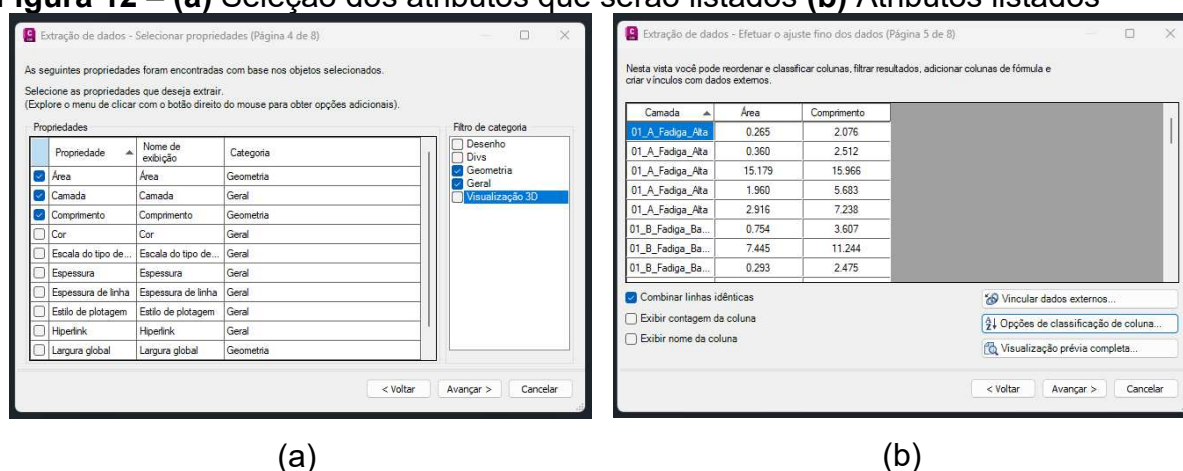
O programa *Autodesk Civil 3D* permite a extração de dados contendo informações importantes como por exemplo o comprimento de cada linha e a área de polígonos. Para tanto, utilizando-se o comando extração de dados, selecionou-se opção de criação de uma nova extração de dados, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Extração de dados no Civil 3D



Na sequência, procedeu-se à seleção das informações mais relevantes para os objetivos da pesquisa. Para este estudo, foram selecionados especificamente os atributos referentes à camada, à área e ao comprimento (Figura 12a). O atributo camada refere-se à nomenclatura atribuída a cada camada, sendo fundamental para a identificação e categorização dos diferentes defeitos analisados.

Figura 12 – (a) Seleção dos atributos que serão listados (b) Atributos listados



Os atributos foram então mensurados (Figura 12b) e esta listagem pode ser exportada no formato .xls, o que possibilita sua posterior manipulação em *softwares* de análise estatística ou planilhas eletrônicas. Essa exportação representa um recurso vantajoso para a etapa de avaliação objetiva, pois facilita a organização, o tratamento e o cálculo dos indicadores necessários, promovendo maior eficiência, reprodutibilidade e rastreabilidade das análises realizadas

3.9.2 Aplicação de novos testes estatísticos

Na Fase 1, foi aplicado o teste comparativo de Wilcoxon Signed-Rank, no entanto, este teste apresenta certas limitações quando se tem muitos empates nos valores analisados. Visto isto, na Fase 2, além do teste de Wilcoxon Signed-Rank, foram utilizados os seguintes testes: teste dos Sinais, teste TOST (*Two One-Sided Tests*) com teste dos Sinais e a análise de correlação de Spearman.

3.9.2.1 Teste dos Sinais

O teste dos Sinais constitui um método estatístico não paramétrico empregado para avaliar diferenças entre duas condições emparelhadas, geralmente observadas em situações em que os mesmos indivíduos são avaliados sob dois tratamentos distintos ou em dois momentos no tempo.

Embora o teste dos sinais apresente menor poder estatístico em comparação a outros procedimentos não paramétricos, como o teste de Wilcoxon para amostras pareadas — uma vez que não considera a magnitude das diferenças, apenas sua

direção —, ele oferece uma vantagem relevante em contextos com grande número de empates entre os pares.

Assim, o teste dos sinais configura-se como uma ferramenta estatística útil e apropriada para análises simples de diferenças pareadas, especialmente em amostras pequenas, não normalmente distribuídas ou com frequência elevada de empates.

As hipóteses formuladas no teste são:

H_0 : inexistência de diferença entre os grupos, sugerindo que a mediana das diferenças é igual a zero;

H_1 : pressupõe a existência de uma diferença significativa entre os grupos, implicando que a mediana das diferenças é diferente de zero.

Sendo que:

- Se $p\text{-valor} \leq \alpha$, rejeita-se H_0 , ou seja, há evidências estatísticas suficientes para considerar que existe uma diferença (ou efeito) significativa.
- Se $p\text{-valor} > \alpha$, não se rejeita H_0 , ou seja, não há evidências suficientes para afirmar que existe uma diferença significativa.

Para esta pesquisa, o nível de significância (α) utilizado foi de 5%.

3.9.2.2 Teste TOST com teste dos Sinais

O teste TOST é uma abordagem estatística utilizada na análise de equivalência, cuja finalidade é avaliar se a diferença entre dois grupos é suficientemente pequena a ponto de ser considerada irrelevante do ponto de vista prático. Diferentemente dos testes tradicionais de hipótese, cujo foco é identificar diferenças estatisticamente significativas, o teste TOST busca fornecer evidências para afirmar que duas condições são estatisticamente equivalentes dentro de um intervalo de tolerância previamente definido.

No contexto de dados pareados e não paramétricos, uma alternativa apropriada à versão paramétrica do teste TOST é a sua aplicação combinada ao teste dos Sinais. Esta combinação é particularmente útil quando os pressupostos de normalidade não são satisfeitos, os dados são assimétricos ou há a presença de muitos empates.

A lógica da aplicação do TOST com o teste dos Sinais segue os princípios fundamentais do teste de equivalência: em vez de realizar um único teste bilateral, são conduzidos dois testes unilaterais independentes. Cada teste verifica se a

mediana das diferenças entre os pares está dentro de limites de equivalência preestabelecidos (por exemplo, $-\Delta$ e $+\Delta$), onde Δ representa a diferença máxima tolerável entre os grupos para que ainda sejam considerados equivalentes.

Para a aplicação com o teste dos sinais, os dados são recodificados de modo a verificar separadamente se a proporção de sinais favoráveis a uma das condições é significativamente menor do que o que seria esperado caso a diferença excedesse um dos limites de equivalência.

Para esta pesquisa, assim como nos estudos de Fontenele, Silvia Júnior e Piton (2007), Pereira et al. (2013) e Pereira, Silvia Júnior e Fontenele (2019), foi considerado como limites de equivalência 10% da escala numérica de avaliação (0 – 100 pontos).

Assim, assume-se as seguintes hipóteses:

- i. Hipóteses nulas (H_0):
 - H_{0a} : A mediana das diferenças é menor ou igual a $-\Delta$
 - H_{0b} : A mediana das diferenças é maior ou igual a $+\Delta$
- ii. Hipóteses alternativas (H_1):
 - H_{1a} : A mediana das diferenças é maior que $-\Delta$
 - H_{1b} : A mediana das diferenças é menor que $+\Delta$

A equivalência entre os grupos só é concluída caso ambas as hipóteses nulas (dos dois testes unilaterais) sejam rejeitadas simultaneamente, ou seja, se as diferenças observadas estiverem contidas dentro dos limites definidos.

3.9.2.3 Correlação de Spearman

A correlação de Spearman (ρ) é uma medida estatística não paramétrica que avalia a associação monotônica entre duas variáveis. Essa correlação baseia-se na ordem dos valores, sendo, portanto, que tolera melhores distorções causadas por *outliers* e é aplicável a dados que não seguem uma distribuição normal.

O coeficiente (ρ) varia entre -1 e $+1$: valores próximos a $+1$ indicam uma forte associação crescente entre as variáveis; próximos a -1 , uma associação decrescente; e próximos de 0 , ausência de relação monotônica. Assim, tem-se:

H_0 : não há correlação monotônica entre as variáveis. Ou seja, as variáveis são estatisticamente independentes em relação à ordem.

H_1 : há uma correlação monotônica significativa entre as variáveis (positiva ou negativa).

Para esta pesquisa foi adotado nível de significando (α) de 5%. Assim:

Se o p-valor $< \alpha$: rejeita-se H_0 , indicando evidência de associação monotônica entre as variáveis.

- Se o p-valor $\geq \alpha$: não se rejeita H_0 , sugerindo ausência de evidência estatística de correlação.

3.9.2.4 Código para aplicação dos testes estatísticos

Para a aplicação dos testes estatísticos mencionados nos itens 3.8.2.1, 3.8.2.2 e 3.8.2.3. foi programado um código na linguagem *Python* com auxílio da ferramenta de inteligência artificial Claude (Anthropic, 2024).

Para tanto foram utilizadas cinco bibliotecas: NumPy, SciPy, Matplotlib, Seaborn e Typing.

A biblioteca NumPy foi utilizada para manipulação eficiente de *arrays* multidimensionais, permitindo o armazenamento e processamento vetorizado de dados numéricos. Complementarmente, empregou-se a biblioteca SciPy, que expandiu as funcionalidades do NumPy ao oferecer métodos especializados para resolução de problemas matemáticos e científicos, tais como integração numérica, álgebra linear, estatística e interpolação.

Para a visualização dos dados e resultados, recorreu-se à biblioteca Matplotlib, a qual possibilitou a construção de gráficos bidimensionais personalizáveis, facilitando a análise exploratória e a apresentação visual dos achados. De modo a aprimorar a expressividade gráfica e incorporar elementos estatísticos aos gráficos, também foi utilizada a biblioteca Seaborn, que, por ser construída sobre o Matplotlib, permite a criação de visualizações mais sofisticadas com menor complexidade de codificação. Por fim, a biblioteca Typing foi empregada com o propósito de definir anotações de tipos nas funções e variáveis, contribuindo para a legibilidade, robustez e manutenção do código.

O código segue apresentado no Apêndice A.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

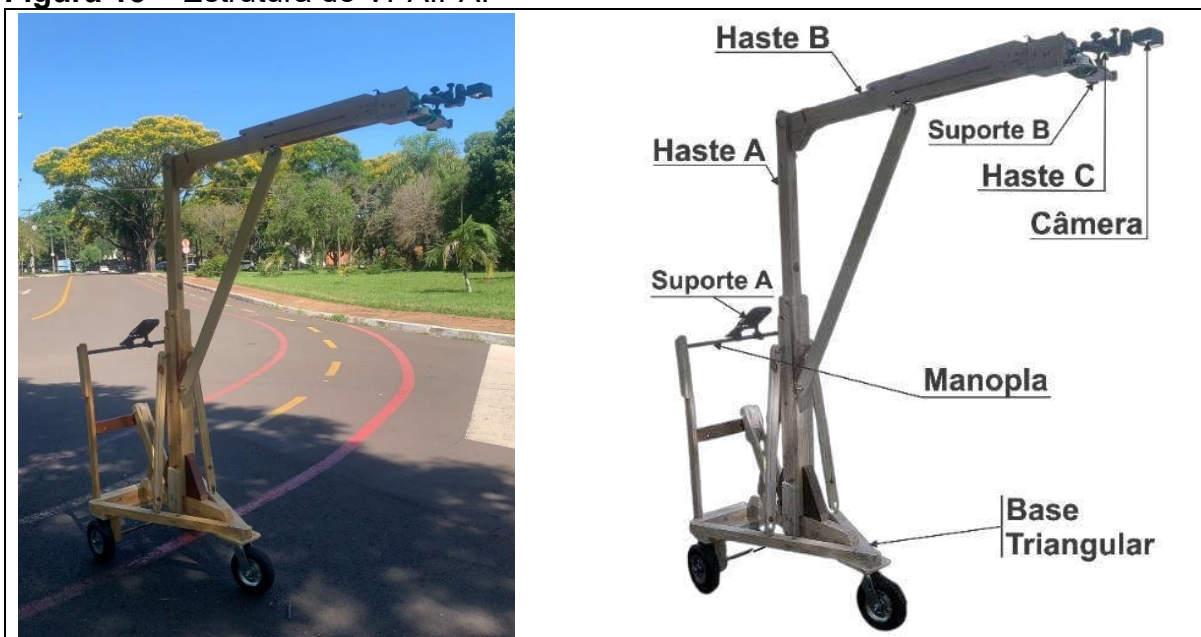
Neste capítulo são apresentados os resultados desta pesquisa, os quais estão subdivididos nos itens: *i.* Desenvolvimento do VPAIPA, *ii.* Teste piloto e *iii.* Aplicação em escala

4.1 FASE 1 - DESENVOLVIMENTO DO VPAIPA

O VPAIPA foi construído com uma haste vertical no centro para se evitar a sobreposição de itens suspensos sobre a via e ainda manter a estabilidade da estrutura do protótipo. Outra questão importante era a necessidade de manter-se a altura constante em relação ao solo, uma vez que essa variação influencia diretamente na sobreposição longitudinal das imagens, sejam elas fotografias ou *frames*. Dessa forma, optou-se por montar a haste vertical com 2,0 m (dois metros) de altura em relação ao solo (haste A), com um braço em balanço de 1,5 m (haste B), como pode ser visto na Figura 13. O comprimento do braço foi escolhido para que a roda dianteira do VPAIPA não aparecesse nas imagens.

Na haste B foi acoplado um suporte para câmera, denominado de haste C (Figura 13). Para a manutenção da bateria da câmera durante o procedimento de campo, optou-se por anexar, na haste C, outro suporte para celular (normalmente utilizado em guidão de motocicletas), no qual foi inserido um carregador portátil.

Figura 13 – Estrutura do VPAIPA.



Vale ressaltar que as peças do VPAIPA são fixadas com parafuso sextavado, com porca do tipo borboleta, o que permite que ele seja parcialmente desmontável, exceto a base triangular, com as três rodas e o suporte retangular com a manopla fixada.

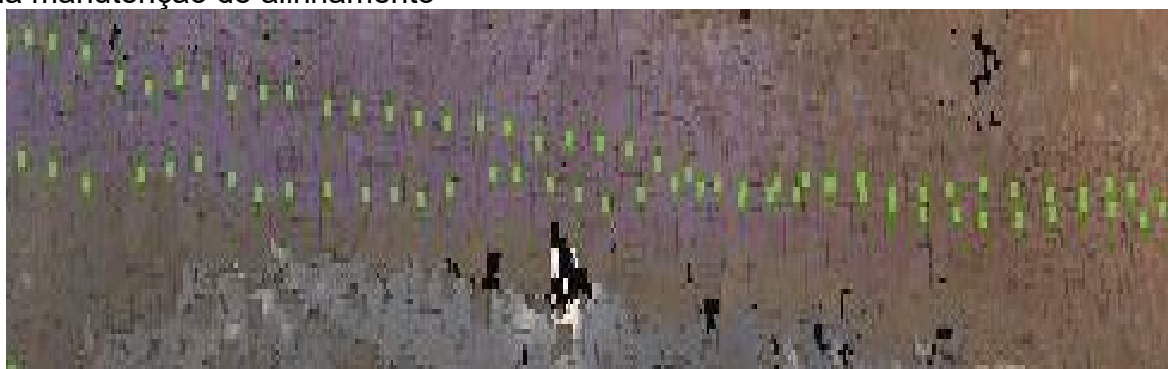
4.2 FASE 1 – TESTE PILOTO

Os testes na UA 144 foram realizados a fim de se definir qual a melhor forma de procedimento para a manutenção do alinhamento longitudinal, bem como para verificar a relação entre a modelagem da via por meio de imagens fotográficas e por vídeos.

4.2.1 Alinhamento longitudinal

A princípio idealizou-se a utilização de uma bússola acoplada à manopla do VPAIPA. No entanto, a baixa precisão desse procedimento impossibilitou que o alinhamento de cada linha de passagem fosse mantido, o que ficou evidenciado no processo de aerotriangulação, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14 – Aerotriangulação com linhas de passagem que se cruzam devido a falhas na manutenção do alinhamento

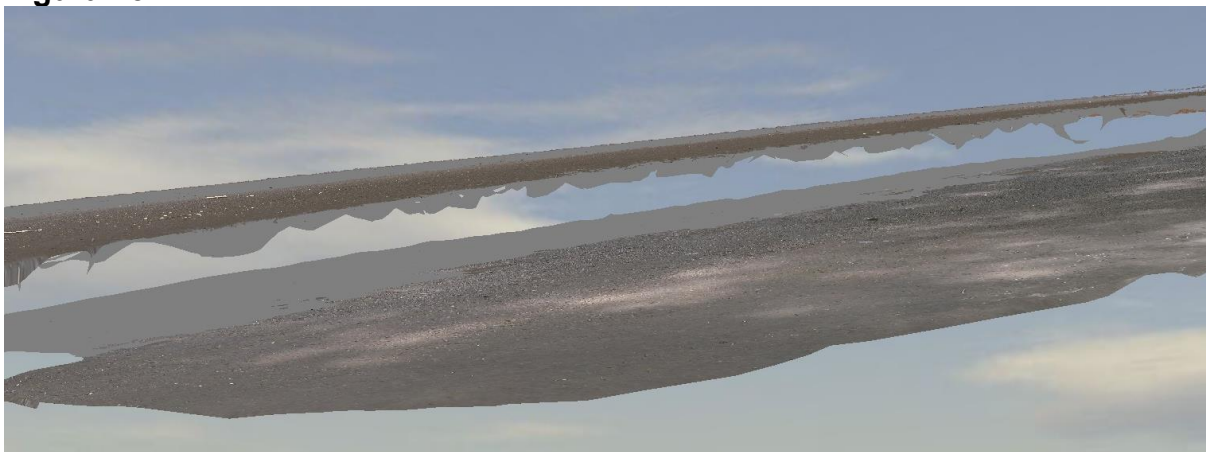


Na Figura 14, duas linhas de passagem estão representadas pelas linhas pontilhada. É possível notar que em certo momento estas linhas chegam a se cruzarem, com isso, não sendo garantida a sobreposição lateral de no mínimo 70%.

Como reflexo da falta de sobreposição, o modelo gerado apresentou diversas falhas como pode ser visto na Figura 15, na qual, é possível notar que a malha gerada apresenta interrupções significativas, reveladas por um grande vão central e a

duplicação incorreta de superfícies. A parte superior da imagem mostra uma faixa de pavimento parcialmente reconstruída, enquanto a parte inferior apresenta uma superfície duplicada.

Figura 15 - Modelo descontínuo



Essas falhas inviabilizaram a geração de modelos digitais utilizando este método de manutenção do alinhamento.

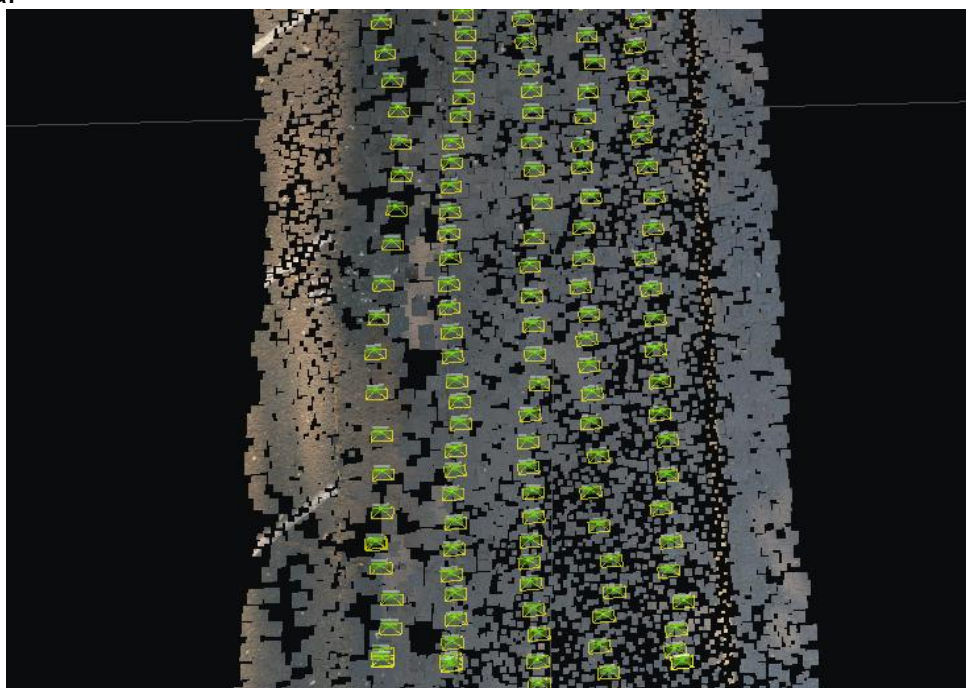
Dessa maneira, optou-se por esticar uma corda guia da lateral do VPAIPA até um eixo conhecido, por exemplo, o meio fio. Assim, uma pessoa com a ponta da corda ia caminhando paralelamente ao VPAIPA, mantendo a corda esticada, como exemplificado na Figura 16.

Figura 16 – Manutenção do alinhamento por meio do esticamento de corda.



Esta forma se mostrou efetiva na manutenção do alinhamento longitudinal, como pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 - Aerotriangulação com alinhamento longitudinal feito pelo método de corda esticada.



4.2.2 Tempo para geração das imagens

A fim de se verificar a agilidade na etapa de geração das imagens, anotou-se os tempos transcorridos para percorrer de cada linha de passagem e os valores são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Tempo gasto para obtenção das imagens digitais dos modelos F02 e V02

Modelo	Linhas de passagem					Tempo Médio	Tempo total
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a		
F02	00:41:00	01:03:00	01:12:00	00:30:00	00:30:00	00:47:12	03:56:00
V02	00:05:07	00:06:04	00:05:38	00:05:26	00:04:52	00:05:25	00:27:07

No modelo F02, levou-se quase 4 horas para a obtenção dos registros fotográficos de todas as linhas de passagem, enquanto para o modelo V02, foram necessários cerca de 30 minutos para a geração dos vídeos as mesmas linhas de passagem. Ou seja, o tempo total gasto para a geração das imagens digitais do

modelo F02 é quase 9 vezes superior que o tempo total para geração dos vídeos do modelo V02.

4.2.3 Avaliação subjetiva e objetiva

As pontuações obtidas na avaliação subjetiva dos três modelos estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Pontuação da Avaliação Subjetiva

	VSA	Classificação
L01 _{subj}	48	Regular
F01 _{subj}	49	
V01 _{subj}	49	

Para as três avaliações o pavimento foi classificado na condição “regular”. É possível observar que não houve grandes diferenças nos valores de VSA obtidos pelas avaliações *in loco* (L01_{subj}) e nos modelos F01_{subj} e V01_{subj}, tendo apenas diferença de 1,0 ponto quando comparado o VSA obtido pela análise em L01_{subj} com os valores obtidos nos modelos F01_{subj} e V01_{subj}.

Vale notar que na escala utilizada a classificação regular é dada pela faixa de valores 41 a 55, assim, os valores observados em L01_{subj}, F01_{subj} e V01_{subj} estão todos situados na faixa central deste intervalo, assim, a classificação da condição do pavimento obtida pela avaliação subjetiva foi a mesma nos três casos, L01_{subj}, F01_{subj} e V01_{subj}.

Já na avaliação objetiva, os valores calculados de PCI para L01_{obj}, F01_{obj} e V01_{obj} são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Pontuação da Avaliação Objetiva

	PCI	Classificação
L01 _{obj}	8,9	Péssima
F01 _{obj}	8,8	
V01 _{obj}	9,0	

Nota-se que ocorreu variação de apenas 0,1 ponto para menos e para mais, variação ainda menor do que aquela observada na avaliação subjetiva. Vale notar que tal variação não foi suficiente para alterar a classificação, uma vez que a classificação “péssima” está situada no intervalo de 0 a 10 pontos.

Embora ambos os métodos tenham como objetivo avaliar o estado funcional do pavimento, observa-se uma divergência significativa entre os resultados obtidos. Notadamente, a aplicação do PCI, de natureza objetiva tende a atribuir classificações mais severas às condições do pavimento. Em contraste, o método VSA, fundamentado na percepção visual do avaliador que geralmente resulta em avaliações mais brandas.

Essa discrepância revela a limitação das abordagens subjetivas, que podem subestimar a gravidade de defeitos estruturais e superficiais, no entanto, não faz parte do escopo desta pesquisa debruçar-se sobre as diferenças conceituais e técnicas das avaliações supracitadas.

4.2.4 Avaliação objetiva com análise dos defeitos par a par

No levantamento L02 foram encontrados 177 defeitos que foram registrados em um croqui manualmente em campo. A fim de se comparar a medição exata de cada defeito *in loco* e nos modelos digitais, utilizou-se o referido croqui para localizar cada um dos 177 defeitos vistos em campo, nos modelos digitais F02 e V02.

Dos 177 defeitos, 160 e 163 foram localizados nos modelos F02 e V02 respectivamente. A Tabela 7 apresenta o número de defeitos identificados em campo que foram localizados e não localizados nos modelos digitais por tipo e severidade.

Tabela 7 – Número de defeitos localizados e não localizados nos modelos F02 e V02.

ID	DEIFEITO	Severidade	L02	Localizado		Não localizado	
				F02	V02	F02	V02
1	Trinca por fadiga	Alta	14	14	14	0	0
10	Trinca longitudinal	Alta	8	8	8	0	0
	Trinca longitudinal	Média	13	11	11	2	2
	Trinca longitudinal	Baixa	38	34	29	4	9
10	Trinca transversal	Média	60	55	59	5	1
	Trinca transversal	Baixa	40	34	38	6	2
11	Remendo	Alta	3	3	3	0	0
19	Desgaste	Média	1	1	1	0	0
Total			177	160	163	17	14

Pela Tabela 7, nota-se que a maior quantidade de defeitos não encontrados nos modelos foram as trincas de baixa severidade. Durante a análise dos modelos F02 e V02 pode-se observar que, conforme o croqui dos defeitos encontrados em

campo no levantamento L02, as principais trincas não encontradas nos modelos digitais estavam localizadas em regiões onde ocorreu sombreamento de árvores e mobiliário urbano sobre a via na geração dos modelos. Tal situação pode ser observada na Figura 18.

Figura 18 – Região do modelo digital com influência de sombras de árvores.



Na região apresentada na Figura 18 deveriam ser encontradas três trincas longitudinais de baixa severidade. Essas trincas deveriam ser visíveis na região central da Figura 18, porém devido à sombra de uma árvore sobre o pavimento, a visualização dessas trincas foi comprometida.

Outro fato percebido durante a comparação dos modelos digitais com o croqui de campo é que, devido às sombras, algumas trincas estavam descontínuas nos modelos, não atingindo o valor de medição registrado no croqui.

As trincas longitudinais de severidade média que não foram encontradas, conforme o croqui, estavam situadas na borda externa da faixa de rolamento. Vale mencionar que durante o levantamento em campo, o alinhamento de cada linha de passagem do VPAIPA era feito de forma manual, assim, veículos estacionados na lateral da via atrapalharam a manutenção de tal alinhamento, o que pode ter afetado na sobreposição das imagens principalmente na lateral da via. Essas dificuldades refletiram nos valores de R-quadrado apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores da correlação R-quadrado entre L02 e F02 e L02 e V02.

ID	DEFEITO	SEVERIDADE	F02	V02
1	Trinca por fadiga	Alta	1,0	1,0
10	Trinca longitudinal	Alta	1,0	1,0
	Trinca longitudinal	Média	1,0	1,0
	Trinca longitudinal	Baixa	0,8	0,6
10	Trinca transversal	Média	0,9	0,9
	Trinca transversal	Baixa	0,8	0,8
11	Remendo	Alta	1,0	1,0
19	Desgaste	Alta	-	-

Os menores valores de R-quadrado obtidos foram de trincas longitudinais e transversais de baixa severidade, o que é explicado devido ao fato de algumas dessas trincas não terem sido localizadas nos modelos. O modelo F02, mesmo tendo maior quantidade de defeitos não encontrados, 17, (como visto na Tabela 7), obteve menor variação dos valores de R-quadrado. Esta situação pode ser explicada pelo fato de que no modelo V02, dos 14 defeitos não localizados, 9 eram do grupo trinca longitudinal de severidade baixa, resultando no menor valor de R-quadrado.

Para todos os outros defeitos o valor obtido foi 1,0, mostrando uma ótima correlação entre os valores obtidos em campo e nos modelos digitais. Apenas para o defeito desgaste não foi possível o cálculo do R-quadrado, uma vez que foi computado um único defeito do tipo desgaste no trecho de estudo. Ainda assim, a área de desgaste obtida no levantamento L02 e nos modelos F02 e V02, foram, respectivamente 245,7 m²; 247,5 m² e 243,2 m²; valores com variação de apenas 0,7% e 1,0%.

Essa variação pode ser justificada pelo fato de a medição do defeito do tipo desgaste realizada em campo, conforme a ASTM (2024), ser feita medindo-se o maior comprimento e a maior largura do defeito e posteriormente computada a área do retângulo com tais dimensões. Já nos modelos, foram desenhados os retângulos acompanhando a curvatura da via.

4.2.5 Testes de hipóteses

Neste tópico serão apresentados os resultados dos testes de normalidade e do teste de hipóteses de Wilcoxon que buscou comparar as medidas dos defeitos *in loco* e nos modelos digitais.

4.2.5.1 Teste de normalidade

O teste de normalidade foi aplicado a fim de se verificar se os grupos de dados seguiam ou não distribuição normal. Foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk para grupos com até 50 amostras. Porém, o grupo de trinca transversal com severidade média, por ter 60 defeitos computados foi analisado pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

Vale ressaltar que estes testes foram aplicados na diferença das medidas dos defeitos encontrados entre os levantamentos L02 e F02; L02 e V02; e F02 e V02. Os resultados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Teste de normalidade

Grupos	Defeito	Severidade	Teste	Estatística	p
L02 x F02	Trinca por fadiga	Alta	Shapiro-Wilk	0,68	< 0,001
	Trinca longitudinal	Alta	Shapiro-Wilk	0,68	0,001
	Trinca longitudinal	Média	Shapiro-Wilk	0,78	0,004
	Trinca longitudinal	Baixa	Shapiro-Wilk	0,66	< 0,001
	Trinca transversal	Média	Kolmogorov-Smirnov	0,35	<0,001
	Trinca transversal	Baixa	Shapiro-Wilk	0,69	< 0,001
	Remendo	Alta	Shapiro-Wilk	NaN	-
L02 x V02	Trinca por fadiga	Alta	Shapiro-Wilk	0,80	0,005
	Trinca longitudinal	Alta	Shapiro-Wilk	0,82	0,046
	Trinca longitudinal	Média	Shapiro-Wilk	0,81	< 0,001
	Trinca longitudinal	Baixa	Shapiro-Wilk	0,81	< 0,001
	Trinca transversal	Média	Kolmogorov-Smirnov	0,34	< 0,001
	Trinca transversal	Baixa	Shapiro-Wilk	0,68	<0,001
	Remendo	Alta	Shapiro-Wilk	NaN	-
F02 x V02	Trinca por fadiga	Alta	Shapiro-Wilk	0,86	0,034
	Trinca longitudinal	Alta	Shapiro-Wilk	0,81	0,037
	Trinca longitudinal	Média	Shapiro-Wilk	0,66	< 0,001
	Trinca longitudinal	Baixa	Shapiro-Wilk	0,77	< 0,001
	Trinca transversal	Média	Kolmogorov-Smirnov	0,40	< 0,001
	Trinca transversal	Baixa	Shapiro-Wilk	0,88	< 0,001
	Remendo	Alta	Shapiro-Wilk	NaN	-

Ao se analisar a distribuição dos dados provenientes da diferença das medidas obtidas em L02 e F02, todos os grupos de defeitos apresentaram p-valor menor que o nível de significância α (0,05), então, foi rejeitada H_0 . Ou seja, não se pode admitir que os conjuntos de dados em questão tenham distribuições normais, ou seja, esses grupos não seguem uma distribuição normal e devem ser tratados como dados não

paramétricos. O mesmo ocorreu nas análises da normalidade das diferenças das medições realizadas *in loco* L02 e no modelo V02, como também entre F02 e V02.

Vale notar que os defeitos remendo e desgaste não puderam ser submetidos a análise de distribuição por terem poucos dados amostrais.

A ausência de normalidade nos dados era um resultado esperado, tendo em vista que, no contexto de grupos pareados, o teste de normalidade foi aplicado sobre as diferenças entre os pares. Considerando a hipótese de que as medidas obtidas *in loco* e aquelas provenientes dos modelos digitais são equivalentes, é esperado que muitas dessas diferenças assumam o valor zero. Essa concentração excessiva de valores idênticos compromete a variabilidade da amostra, dificultando o ajuste a uma distribuição normal.

Diante da constatação de que os grupos analisados não seguem uma distribuição normal — caracterizando-se, portanto, como dados não paramétricos —, optou-se pela aplicação do teste estatístico de Wilcoxon para comparação entre os grupos. Esse teste é especialmente indicado para situações em que os pressupostos dos testes paramétricos não são atendidos, sendo adequado para dados emparelhados e de natureza ordinal ou contínua. Os resultados obtidos por meio dessa análise são apresentados nas seções 4.5.1, 4.5.2 e 4.5.3.

4.2.5.2 Comparação entre L02 e F02

Os resultados da análise estatística realizada por meio do teste de Wilcoxon, comparando as medidas obtidas *in loco* com aquelas derivadas do modelo gerado a partir das fotografias (L02 e F02), estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Teste comparativo entre as medições dos levantamentos L02 e F02

Defeito	Severidade	teste	Estatística	Pares empatados	P	Condição
Trinca por fadiga	Alta	W	11,50	7	0,734	Aceitar H_0
Trinca longitudinal	Alta	W	6,00	2	0,395	Aceitar H_0
Trinca longitudinal	Média	W	34,50	4	0,173	Aceitar H_0
Trinca longitudinal	Baixa	W	221,00	17	< 0,001	Rejeitar H_0
Trinca transversal	Média	W	248,00	37	0,004	Rejeitar H_0
Trinca transversal	Baixa	W	116,50	24	0,012	Rejeitar H_0

Os grupos trinca por fadiga com severidade alta, trinca longitudinal com severidade alta e média obtiveram p-valores maiores do que o nível de significância α

(0,05), assim, deve-se não rejeitar H_0 e rejeitar H_1 , com isso, pode-se dizer que não existem diferenças nas medidas observadas em L02 e em F02 para estes grupos.

Porém, os grupos dos defeitos de trinca longitudinal de severidade baixa, trinca transversal com severidade média e baixa, os p-valores foram menores do que o nível de significância α (0,05), assim, deve-se aceitar H_1 e rejeitar H_0 . Portanto, foi observado que existem diferenças nas medidas observadas em L02 e em F02 para estes grupos de defeitos.

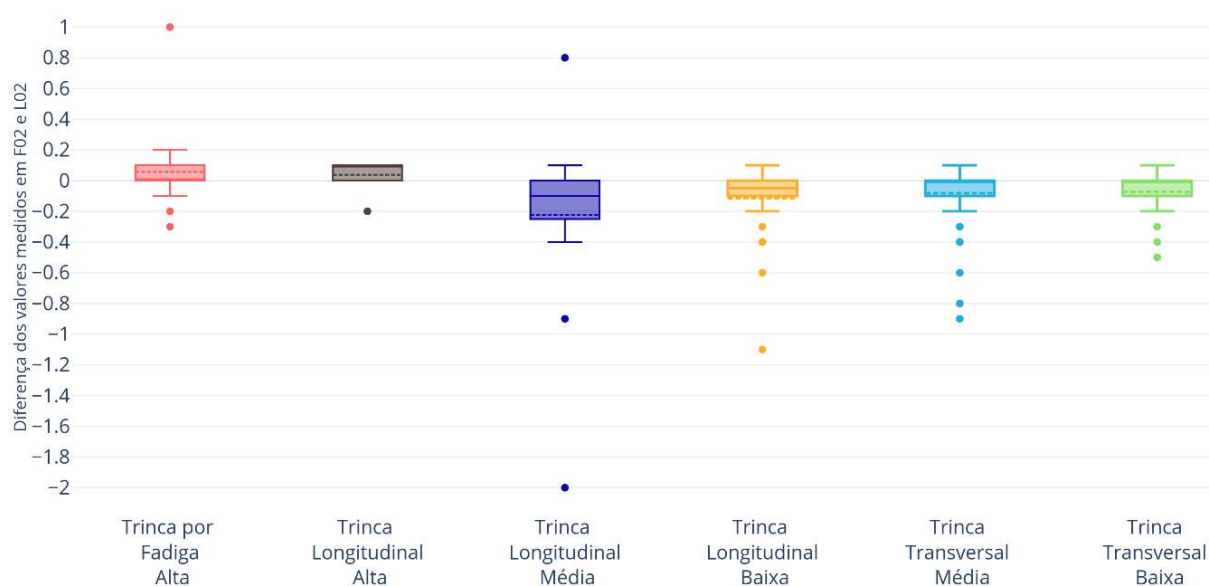
Ao se comparar os valores da Tabela 10 com aqueles apresentados na Tabela 7 era de se esperar que os três grupos que tiveram maior quantidade de defeitos não localizados (trinca longitudinal com severidade alta, trinca transversal com severidade média e trinca transversal com severidade baixa) apresentassem diferença estatística no teste de *Wilcoxon*. Esta situação também pode ser justificada pela análise da estatística descritiva (Tabela 11) e do gráfico apresentado na Figura 19.

Tabela 11 – Estatística Descritiva

	Defeito	Severidade	N	Mediana	Percentis		
					25th	50th	75th
L02 x V02	Trinca por fadiga	Alta	14	0,000	0,000	0,000	0,075
	Trinca longitudinal	Alta	8	0,100	0,000	0,100	0,100
	Trinca longitudinal	Média	13	-0,100	-0,200	-0,100	0,000
	Trinca longitudinal	Baixa	38	-0,050	-0,100	-0,050	0,000
	Trinca transversal	Média	60	0,000	-0,100	0,000	0,000
	Trinca transversal	Baixa	40	0,000	-0,100	0,000	0,000
	Remendo	Alta	3	0,000	0,000	0,000	0,000

A Tabela 11 apresenta o número de amostras de cada defeito e o valor da mediana. Já a Figura 19 apresenta o gráfico Box Plot, que mostra a distribuição das diferenças de valores medidos entre F02 e L02 para diferentes grupos de defeitos.

Pela Figura 19 é possível notar que a amplitude da caixa (retângulos) é pequena para todos os grupos de defeitos, tendo intervalo interquartilico concentrado, o que indica que os dados estão densos e muito próximos ao valor da média, que foi muito próxima a zero. O valor zero representa que não há diferença entre as medidas obtidas *in loco* e no modelo F02.

Figura 19– Box Plot da diferença das medidas obtidas em L02 e F02.

Porém, é possível observar que existem alguns *outliers* com valores predominantemente negativos, sugerindo que os valores em L02 foram maiores do que em F02.

4.2.5.3 Comparação entre L02 e V02

Os resultados dos testes comparativos, realizados por meio do teste de Wilcoxon, entre os valores medidos *in loco* (L02) e aqueles obtidos no modelo V02, discriminados por tipo de defeito, estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Teste comparativo entre as medições dos levantamentos L02 e V02

Defeito	Severidade	teste	Estatística	Pares empatados	p	Condição
Trinca por fadiga	Alta	W	9,50.	6	0,262	Aceitar H_0
Trinca longitudinal	Alta	W	9,00	4	0,201	Aceitar H_0
Trinca longitudinal	Média	W	30,00	4	0,407	Aceitar H_0
Trinca longitudinal	Baixa	W	378,00	11	< 0,001	Rejeitar H_0
Trinca transversal	Média	W	247,00	36	0,006	Rejeitar H_0
Trinca transversal	Baixa	W	114,00	25	0,002	Rejeitar H_0

Assim como ocorreu na comparação dos dados L02 e F02, na comparação entre L02 e V02, os grupos dos defeitos trinca por fadiga com severidade alta, trinca longitudinal com severidade alta e média não apresentaram diferença estatisticamente

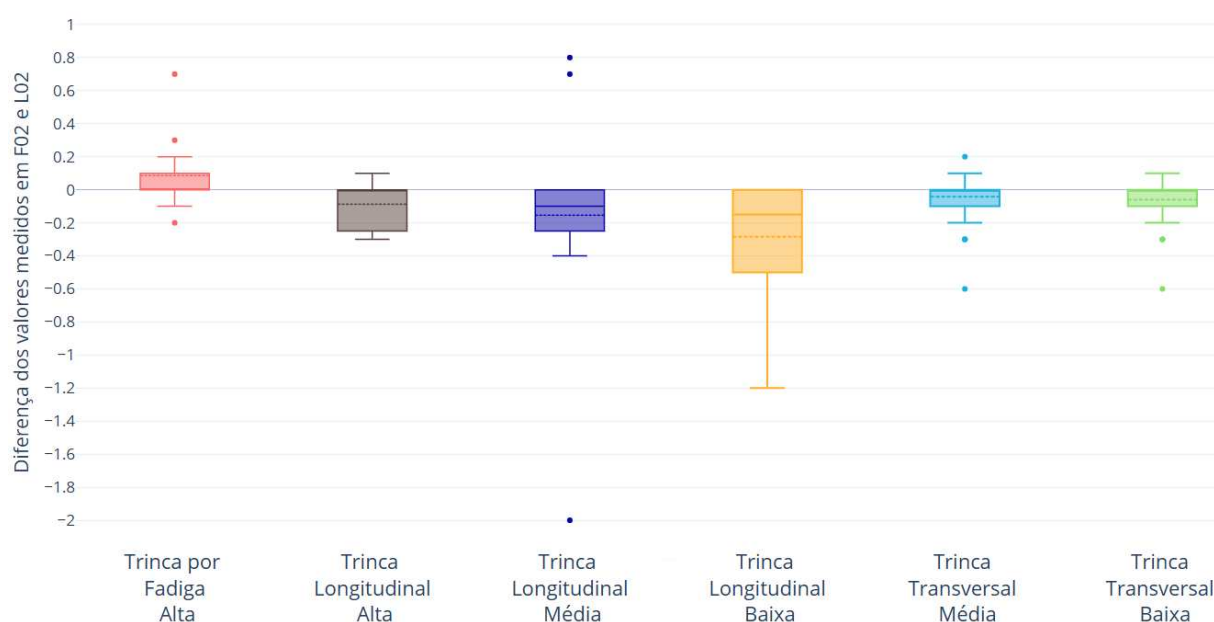
significante. Os grupos trinca longitudinal de severidade baixa e trinca transversal de severidade média e baixa, os p-valores obtidos foram menores do que o nível de significância α (0,05), assim, foi rejeitada H_0 . Portanto, foi observado que existe diferença nas medidas observadas em L02 e em V02 para estes grupos.

A estatística descritiva está na Tabela 13 e a dispersão, mediana e *outliers* das diferenças para cada tipo de defeito podem ser observados na Figura 20.

Tabela 13 – Estatística Descritiva

	Defeito	Severidade	N	Mediana	Percentis		
					25th	50th	75th
L02 x V02	Trinca por fadiga	Alta	14	0,000	0,000	0,000	0,100
	Trinca longitudinal	Alta	8	0,000	-0,225	0,000	0,000
	Trinca longitudinal	Média	13	-0,100	-0,200	-0,100	0,000
	Trinca longitudinal	Baixa	38	-0,150	-0,475	-0,150	0,000
	Trinca transversal	Média	60	0,000	-0,100	0,000	0,000
	Trinca transversal	Baixa	40	0,000	-0,100	0,000	0,000
	Remendo	Alta	3	0,000	0,000	0,000	0,000

Figura 20 – Box Plot da diferença das medidas obtidas em L02 e V02



Pela Figura 20 é possível notar:

- i. O grupo trinca por fadiga com severidade alta foi o único que apresentou mediana positiva. Ou seja, as medidas encontradas em L02 foram ligeiramente maiores que em V02.

- ii. Nos demais grupos, a mediana negativa indica que os valores encontrados em L02 foram ligeiramente menores que em V02. O que pode estar atrelado à precisão do método de medição dos defeitos utilizado em campo, lembrando que foi utilizado o odômetro manual com precisão de 0,001 m.
- iii. O grupo a trinca longitudinal baixa apresenta a maior dispersão de dados, o que corrobora com o resultado obtido pelo teste de Wilcoxon.

4.2.5.4 Comparação entre F02 e V02

A fim de se comparar os modelos gerados a partir de fotos (F02) e vídeos, (V02), também foi utilizado o teste de Wilcoxon e os resultados são expostos na Tabela 14.

Tabela 14 – Teste comparativo entre as medições dos levantamentos F02 e V02

Defeito	Severidade	teste	Estatística	Pares pareados	p	Condição
Trinca por fadiga	Alta	W	13	6	0,527	Aceitar H_0
Trinca longitudinal	Alta	W	33	0	0,066	Aceitar H_0
Trinca longitudinal	Média	W	15,00 ^a	6	0,933	Aceitar H_0
Trinca longitudinal	Baixa	W	217,50 ^b	17	< 0,001	Rejeitar H_0
Trinca transversal	Média	W	78,50 ^c	40	0,330	Aceitar H_0
Trinca transversal	Baixa	W	96,00 ^d	20	0,750	Aceitar H_0

Na comparação das medidas realizadas em ambos os modelos (F02 e V02) pelo teste de Wilcoxon, apenas o grupo de trinca longitudinais de severidade baixa apresentou p-valor menor do que o nível de significância e teve a hipótese nula rejeitada, logo, deve-se assumir que existe diferença nas medidas observadas em F02 e em V02 para este grupo.

O que condiz com o fato de que a trinca longitudinal de severidade baixa, conforme a Tabela 7, foi a que teve maior número de defeitos não localizados.

Para os demais grupos, não se pode rejeitar H_0 , ou seja, assume-se que não existe diferença estatisticamente significativa entre as medidas observadas em F02 e em V02 para os grupos demais grupos.

4.2.5.5 Comparações sem os defeitos não localizados

Em suma, os grupos dos defeitos que as medições nos modelos (F02 e V02) não podem ser consideradas iguais às medições *in loco*, ou seja, aqueles que se deve rejeitar a hipótese nula, foram trinca longitudinal com severidade baixa, trinca transversal de severidade média e baixa, como visto na Tabela 15.

Tabela 15 – Resumo da rejeição ou não da hipótese nula.

Defeito	Severidade	L02 x F02		L02 x V02	
		Não rejeitar H_0	Rejeitar H_0	Não rejeitar H_0	Rejeitar H_0
Trinca por fadiga	Alta	x		x	
Trinca longitudinal	Alta	x		x	
Trinca longitudinal	Média	x		x	
Trinca longitudinal	Baixa		x		x
Trinca transversal	Média		x		x
Trinca transversal	Baixa		x		x

Como já citado, alguns desses defeitos estavam em regiões onde a imagem dos modelos ficaram com nitidez comprometida devido ao sombreamento de árvores, ou na borda externa da pista, onde a possível falta para manter o alinhamento do VPAIPA pode ter diminuído a sobreposição das imagens capturadas, e com isso, reduzido a qualidade do modelo gerado.

Então, a fim de se comparar as demais medições destes grupos, sem a influência dos defeitos não localizados, refez-se os testes comparativos excluindo-os. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Comparação das medições sem a influência dos defeitos não localizados.

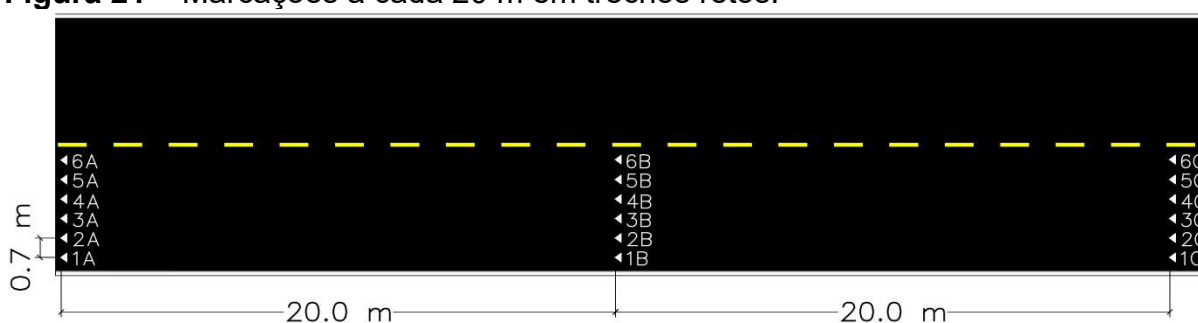
Grupos	Defeito	Sev.	teste	Estatística	Pares pareados	p	Condição
L02 x F02	Trinca longitudinal	Baixa	W	143,00	17	0,001	Rejeitar H_0
	Trinca transversal	Média	W	143,00	37	0,062	Aceitar H_0
	Trinca transversal	Baixa	W	35,50	24	0,434	Aceitar H_0
L02 x V02	Trinca longitudinal	Baixa	W	171,00	11	< 0,001	Rejeitar H_0
	Trinca transversal	Média	W	157,00	39	0,052	Aceitar H_0
	Trinca transversal	Baixa	W	85,00	25	0,006	Rejeitar H_0

Com a exclusão dos defeitos não encontrados, apenas os grupos de trincas com severidades baixas continuaram apresentando diferença entre as medições realizadas *in loco* (L02) e em ambos os modelos, F02 e V02.

4.3 FASE 2 – ALINHAMENTO LONGITUDINAL

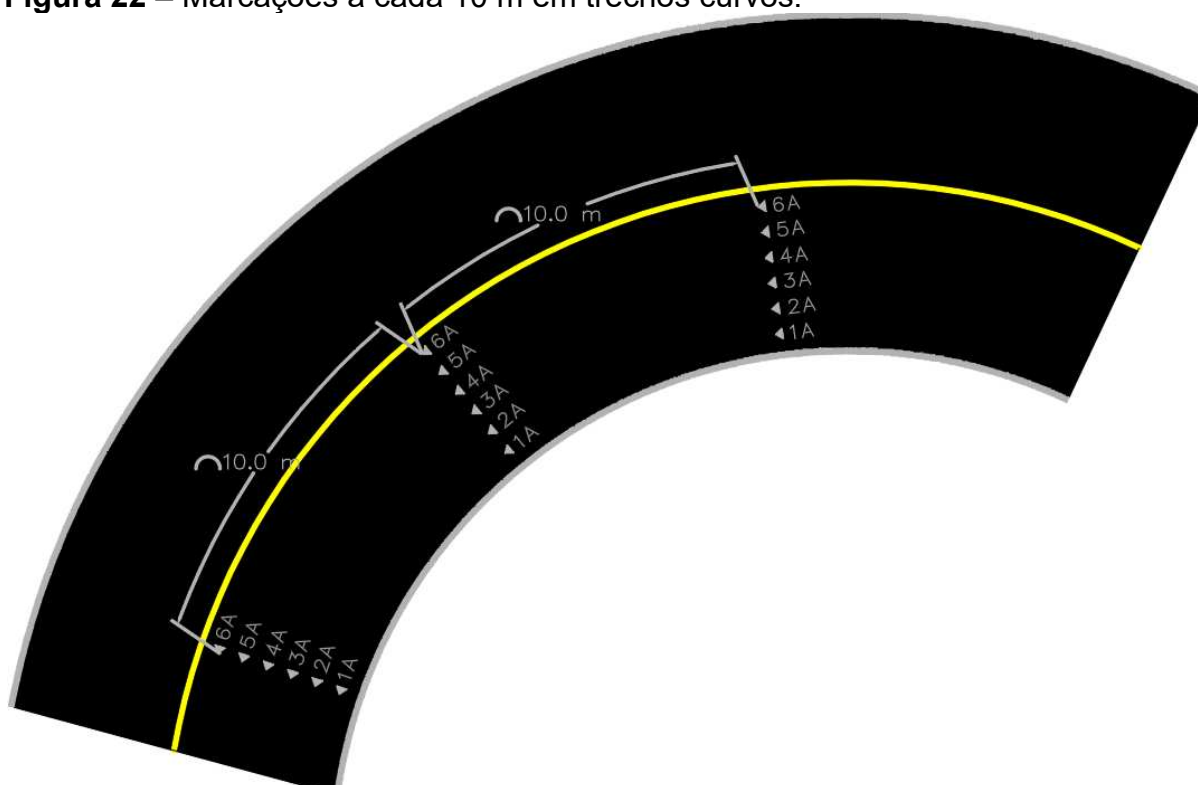
Com o alinhamento longitudinal mantido por corda, como proposto na Fase 1, eram necessárias duas pessoas durante todo o procedimento de captura de imagens com o VPAIPA. Para que apenas uma pessoa pudesse fazer o procedimento de captura de imagens, na Fase 2, optou-se por demarcar os pontos de linha de passagem no pavimento com giz a cada 20 m (Figura 21), e não apenas no começo e no final de cada UA como havia sido feito anteriormente.

Figura 21 – Marcações a cada 20 m em trechos retos.



Para os trechos curvos reduziu-se a distância entre as marcações para cada 10 m, para melhor acompanhamento da curvatura como mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Marcações a cada 10 m em trechos curvos.



A utilização das marcações a cada 20 m (trechos retos) ou 10 m (trechos curvos) mostrou-se satisfatória ao se observar a representação do trecho na etapa de aerotriangulação, como mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Aerotriangulação com alinhamento longitudinal feito por marcação de pontos no pavimento



4.4 FASE 2 - ANÁLISE DA AVALIAÇÃO SUBJETIVA

Na avaliação subjetiva realizada, das 47 Unidades Amostrais (UAs) analisadas, observou-se que 28 delas apresentaram a mesma classificação, independentemente do método utilizado — seja por inspeção direta *in loco*, seja por meio da interpretação dos ortomosaicos gerados.

No entanto, para as 19 UAs restantes, a classificação atribuída com base nos ortomosaicos foi mais severa do que aquela feita *in loco*. O que sugere que foi possível identificar um número maior de defeitos que, eventualmente, passaram despercebidos na avaliação *in loco*. A distribuição dessas classificações encontra-se detalhada na Tabela 17.

Tabela 17 – Quantidade de UAs que apresentaram classificações diferentes pela avaliação subjetiva *in loco* x ortomosaico

Classificação		Quantidade
<i>in loco</i>	ortomosaico	
Excelente	Muito boa	6
Muito boa	Boa	12
Regular	Ruim	1
Total		19

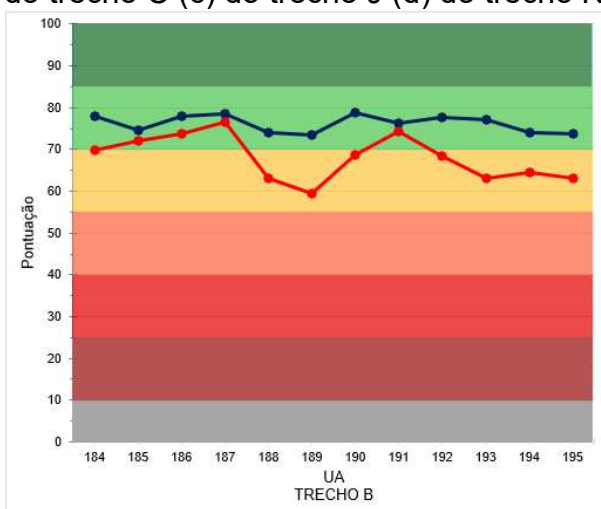
A análise da Tabela 17 revela que as UAs que obtiveram as maiores pontuações na avaliação subjetiva *in loco* — sendo classificadas como em condições excelentes ou muito boas — apresentaram maior variação nas classificações atribuídas com base na avaliação realizada por meio dos ortomosaicos. Esse resultado sugere uma tendência à avaliação mais rigorosa quando a análise é feita com base nas imagens, o que pode indicar maior sensibilidade na identificação de defeitos na superfície do pavimento nesse formato de observação.

Os gráficos da Figura 24 mostram a pontuação do Índice de Condição do Pavimento (ICP) atribuída para cada UA dos trechos analisados.

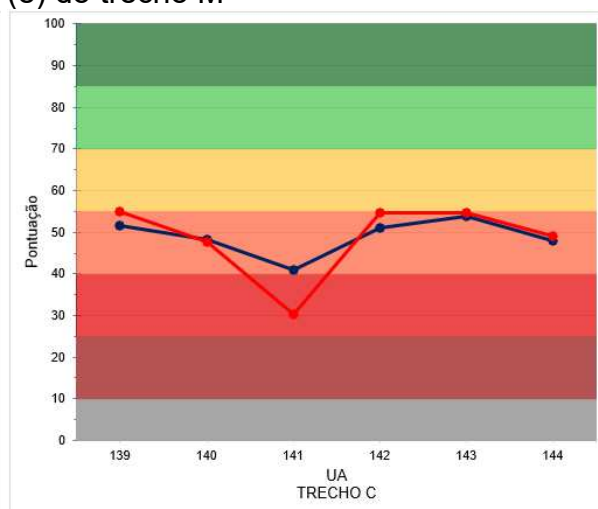
A análise dos gráficos apresentados na Figura 24 (a), (c) e (e) evidencia o padrão de pontuações mais baixas nas avaliações realizadas por meio dos ortomosaicos, especialmente nas UAs classificadas como “boa”, “muito boa” ou “excelente”. Esse comportamento sugere uma tendência à atribuição de avaliações mais rigorosas quando a análise é conduzida com base em imagens, em comparação à observação *in loco* para essas classes de ICP.

Embora esse padrão não tenha se repetido nas demais classes de condição, apenas a UA 141, pertencente ao trecho C, apresentou uma variação de pontuação suficientemente expressiva para alterar sua classificação, passando de “regular” na avaliação *in loco* para “ruim” na avaliação com base nos ortomosaicos — o que reforça a tendência de maior rigor observada nas análises por imagem.

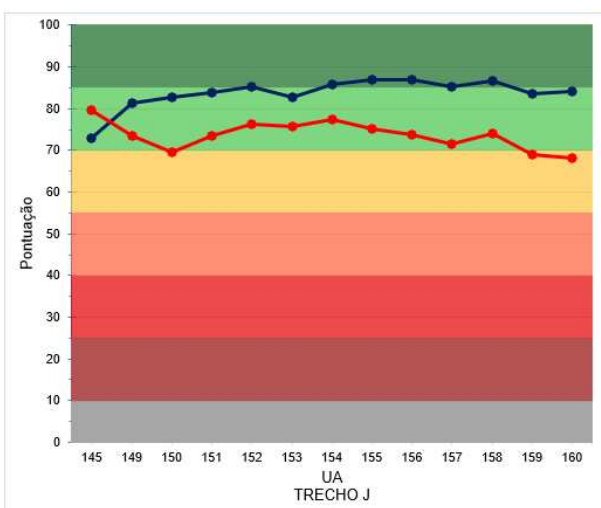
Figura 24 – Pontuação do ICP da Avaliação Subjetiva de cada UA (a) do trecho B (b) do trecho C (c) do trecho J (d) do trecho K (e) do trecho M



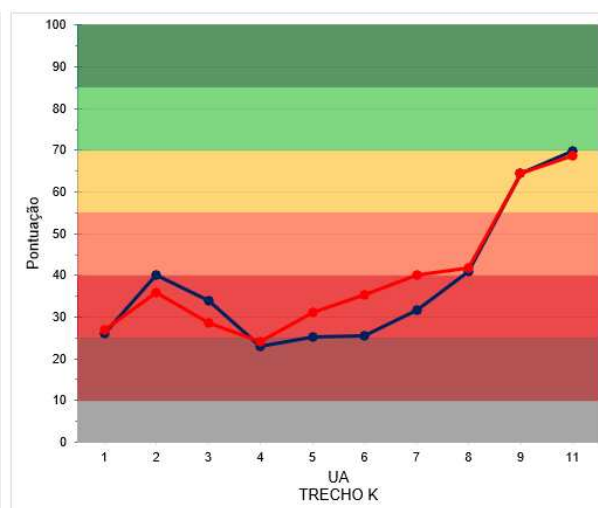
(a)



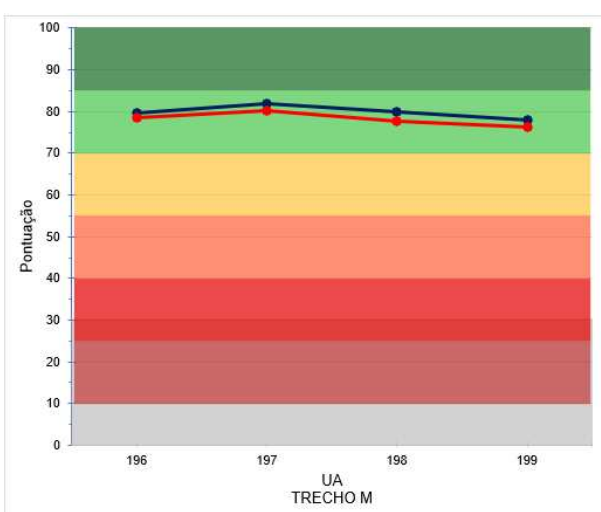
(b)



(c)



(d)



(e)

Legenda

- Excelente
- Muito boa
- Boa
- Regular
- Ruim
- Muito ruim
- Péssima
- ICP sub_in loco
- ICP sub_ortomosaico

Embora 19 Unidades de Amostragem (UAs) tenham apresentado variações nas classificações individuais, a análise agrupada por trechos indicou que apenas o trecho B apresentou divergência entre as avaliações realizadas *in loco* e aquelas baseadas nos ortomosaicos, conforme apresentado na Tabela 18.

Essa diferença segue o padrão observado anteriormente, no qual as pontuações atribuídas a partir dos ortomosaicos tendem a ser mais severas em comparação com a avaliação presencial.

Tabela 18 - Avaliação subjetiva por trecho

Trecho	Nº UAs		Pontuação		Classificação	
	total	com variação	<i>in loco</i>	ortomosaico	<i>in loco</i>	ortomosaico
B	12	8	76,2	68,1	MUITO BOA	BOA
C	6	1	48,9	48,5	REGULAR	REGULAR
J	14	10	83,6	73,3	MUITO BOA	MUITO BOA
K	11	0	41,1	43,0	REGULAR	REGULAR
M	4	0	79,9	78,2	MUITO BOA	MUITO BOA

Observa-se que, embora o trecho J tenha apresentado o maior número de UAs (10 UAs) com variações na classificação, essa diferença na classificação das UAs não foi suficiente para alterar a média final do trecho, mantendo-se a condição “muito boa” em ambas as análises.

Diferentemente, no trecho B, a variação nas classificações resultou em mudança na condição final atribuída. Essa diferença pode estar relacionada ao fato de que, apesar de ambos os trechos (B e J) apresentarem a mesma classificação pela avaliação *in loco*, a pontuação média do trecho B já era inferior à do trecho J, tornando-o mais suscetível à reclassificação diante de pequenas variações.

4.4.1 Testes de hipóteses com os dados da Avaliação Subjetiva

Utilizando-se o algoritmo descrito no item 3.9.2.4 obteve-se os seguintes resultados:

i. WILCOXON SIGNED-RANK:

P-valor: 0,000055

Resultado: Rejeita-se H_0

ii. TESTE DOS SINAIS:

P-valor: 0,003088

Resultado: Rejeita-se H_0

iii. TOST COM TESTE DOS SINAIS:

P-valor teste 1: 0,000000

P-valor teste 2: 0,005676

Resultado: Equivalência demonstrada

iv. CORRELAÇÃO DE SPEARMAN:

Correlação de Spearman (ρ): 0,7841 ρ^2 (coeficiente de determinação): 0,6149 (61,49%)

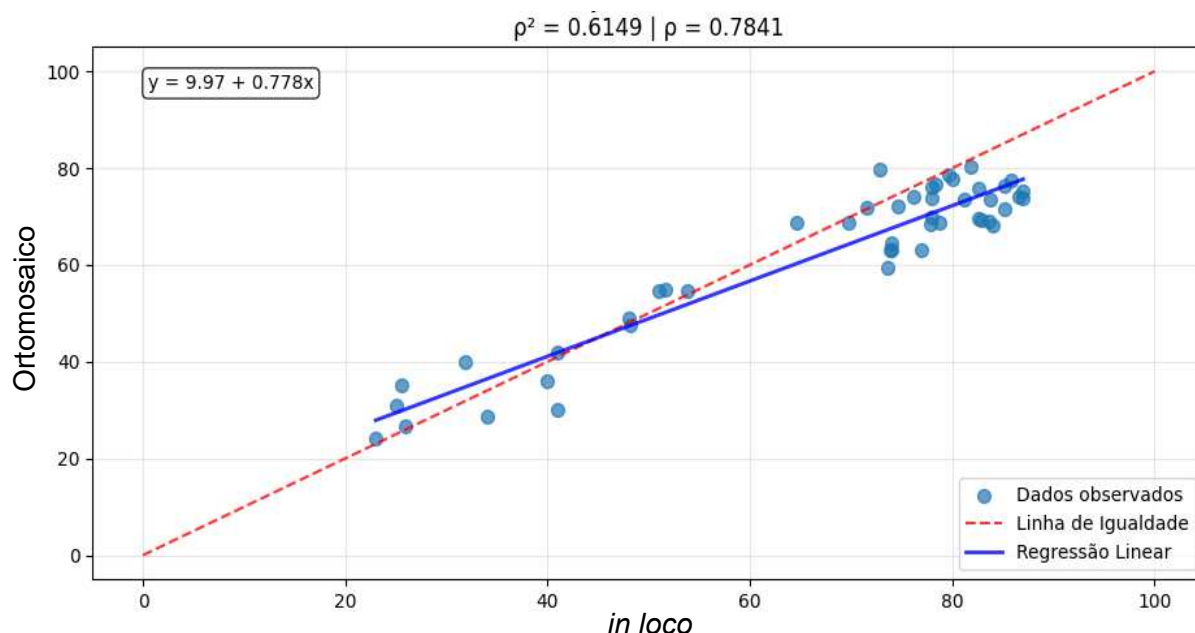
Interpretação: Correlação moderada

Dos quatro testes aplicados, o teste de Wilcoxon e o teste dos sinais resultaram na rejeição da hipótese nula, indicando a existência de diferença estatisticamente significativa entre os dados obtidos na avaliação *in loco* e aqueles provenientes dos ortomosaicos.

No entanto, ao se empregar um teste com maior poder estatístico, como o TOST combinado com o teste dos sinais, os resultados indicaram equivalência entre os grupos avaliados. Essa evidência foi reforçada pela análise de correlação de Spearman, que revelou uma associação positiva, ainda que moderada, entre os conjuntos de dados, sugerindo consistência entre os métodos de avaliação utilizados.

Por meio do algoritmo, também foi possível gerar os gráficos de correlação, de distribuição das diferenças e o *boxplot* das diferenças entre os valores obtidos na avaliação subjetiva *in loco* e na avaliação subjetiva realizada com base nos ortomosaicos. Esses gráficos são apresentados, respectivamente, nas Figuras 25, 26 e 27, e contribuem para a visualização e interpretação das relações e discrepâncias entre os dois métodos de avaliação.

Figura 25 - Correlação entre avaliação subjetiva *in loco* e pelos ortomosaicos

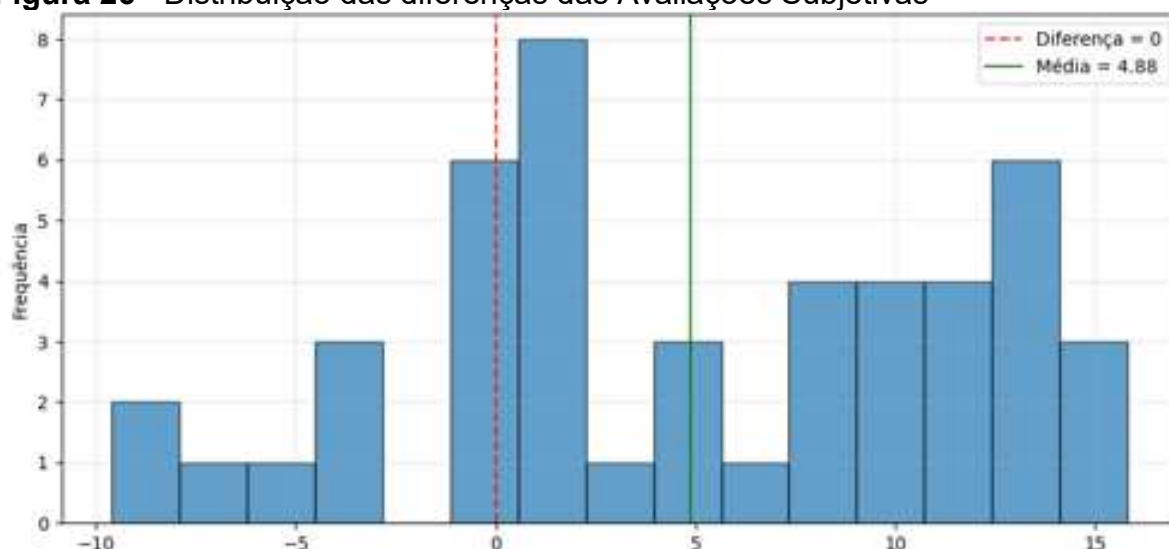


Analisando o gráfico da Figura 25, é possível notar que a linha da regressão (linha contínua azul) está abaixo da linha de igualdade (linha tracejada vermelha) em praticamente toda a faixa, indicando que os valores observados pela avaliação subjetiva dos ortomosaicos tendem a ser inferiores aos valores observados pela avaliação subjetiva *in loco*, especialmente nos extremos mais altos.

Embora a reta de regressão apresente inclinação inferior a 1 — com coeficiente angular igual a 0,778 —, o que sugere uma tendência da avaliação subjetiva realizada com base nos ortomosaicos a subestimar os valores obtidos *in loco*; a correlação de Spearman ($\rho = 0,7841$) indica que essa diferença não é estatisticamente significativa. Isso implica que não há evidência suficiente para afirmar, que a inclinação da reta difere da linha de igualdade ($y = x$), reforçando a consistência entre os métodos de avaliação, apesar da leve tendência de subestimação.

O gráfico apresentado na Figura 26 mostra a distribuição das diferenças entre os valores obtidos pelas avaliações *in loco* e pelos ortomosaicos. Observa-se uma predominância de diferenças positivas, ou seja, na maior parte dos casos, os valores registrados *in loco* foram maiores do que aqueles obtidos pelos ortomosaicos corroborando com o que foi observado na análise da Figura 25.

Figura 26 - Distribuição das diferenças das Avaliações Subjetivas



Ainda analisando a Figura 26, a linha vermelha tracejada indica a referência da diferença igual a zero, e a maioria das observações está situada à sua direita, evidenciando essa tendência.

Embora existam algumas observações com diferenças negativas — ou seja, casos em que a avaliação subjetiva pelos ortomosaicos apresentou valores maiores — estas são menos frequentes e não anulam a tendência geral.

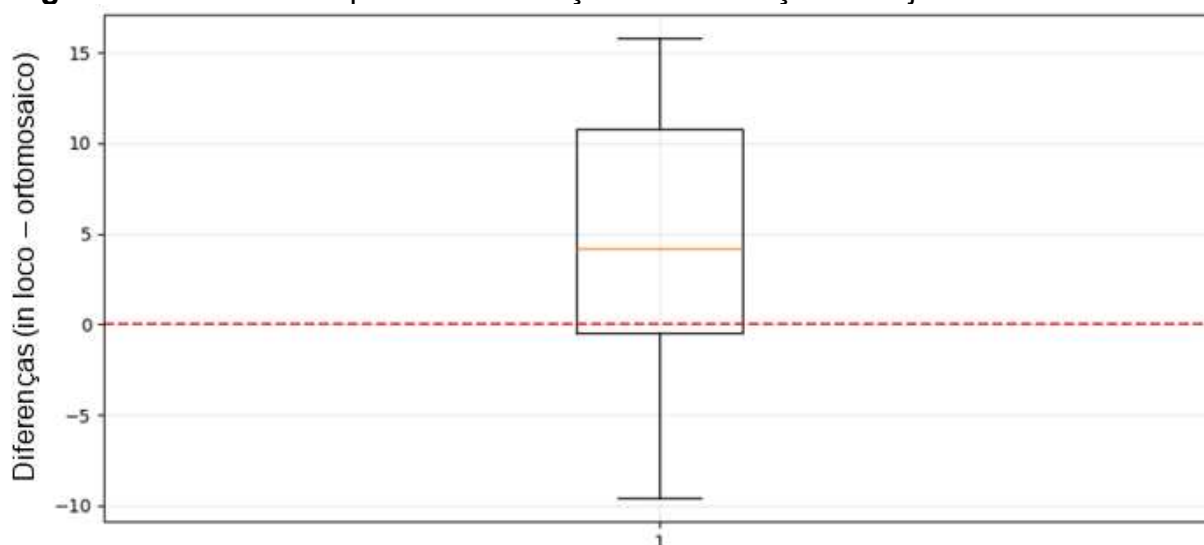
A forma irregular e assimétrica da distribuição indica que os dados não seguem uma distribuição normal, o que está de acordo com os resultados obtidos no teste de Shapiro-Wilk. Esses padrões justificam o uso de testes não paramétricos.

Assim, o gráfico corrobora visualmente os achados estatísticos, demonstrando que as avaliações *in loco* tendem a apresentar valores sistematicamente mais elevados do que as obtidas pelas avaliações dos ortomosaicos.

Destaca-se, ainda, que as maiores diferenças (superiores a 10 pontos) foram observadas apenas nos trechos B e J, além da Unidade de Amostragem 141 do trecho C.

Na Figura 27 é apresentado o gráfico Boxplot das diferenças dos valores observados nas avaliações subjetivas *in loco* e avaliações subjetivas pelos ortomosaicos.

Figura 27 - Gráfico Boxplot das diferenças das Avaliações Subjetivas



O boxplot das diferenças entre os dois métodos (*in loco* – ortomosaico) da Figura 27, mostra que a mediana das diferenças é positiva, reforçando a tendência observada no gráfico de dispersão (Figura 25).

A distribuição das diferenças apresenta maior concentração acima de zero, com alguns poucos valores negativos considerados atípicos, nos quais a avaliação pelos ortomosaicos superou a avaliação *in loco*. A linha vermelha horizontal representa o ponto de ausência de diferença e encontra-se abaixo da mediana, ilustrando visualmente a prevalência de avaliações *in loco* superiores.

Em conjunto, os gráficos confirmam uma certa discrepância entre os dois métodos, na qual o método *in loco* tende a fornecer avaliações mais elevadas. Essa diferença é consistente com os resultados obtidos anteriormente por meio de testes estatísticos, como o teste de Wilcoxon e o teste do sinal, tendo que se analisar com certo zelo os resultados do teste TOST associado ao teste dos Sinais.

4.5 FASE 2 – ANÁLISE DA AVALIAÇÃO OBJETIVA

Na avaliação objetiva foram analisadas as mesmas 47 UAs, e apenas três apresentaram divergências na classificação da condição do pavimento *in loco* e pela avaliação dos ortomosaicos. As UAs 3 e 4, situadas no trecho K (trecho mais solicitado pela passagem de veículos pesados), haviam sido classificadas na avaliação *in loco* com condição muito ruim, mas pela avaliação dos ortomosaicos receberam classificação péssima.

A outra UA que apresentou divergência foi a UA 145 que está localizada no trecho J. Inicialmente, foi classificada como de condição “boa” na avaliação *in loco*, mas passou a receber a classificação “muito boa” na avaliação realizada com base no ortomosaico.

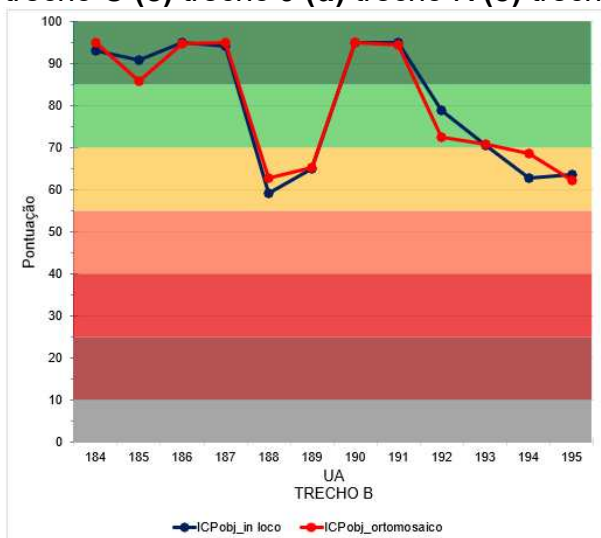
Essa discrepância pode estar relacionada a dois fatores principais. O primeiro refere-se ao valor atribuído à UA na avaliação *in loco*, classificada como “boa” com uma pontuação de 69,25 — ou seja, muito próxima do limite inferior da categoria “muito boa”, que se inicia em 70 pontos. Nesse contexto, pequenas variações na quantificação dos defeitos ou na medição da área podem ser suficientes para alterar a classificação final. O segundo fator diz respeito à própria medição da área da UA, que apresentou uma diferença significativa de 35 m² a mais quando realizada com base no ortomosaico. Essa divergência provavelmente decorre do método utilizado na medição *in loco*, que consistiu na multiplicação direta do comprimento pela largura da unidade, pressupondo um formato retangular. No entanto, como a UA não possuía um formato perfeitamente regular, essa simplificação geométrica pode ter comprometido a precisão da área calculada em campo.

Vale lembrar que a área da UA impacta diretamente no cálculo do ICP, pois as densidades dos defeitos (expressas como percentual da área afetada dentro da UA) são fundamentais para aplicar os coeficientes de severidade e dedução.

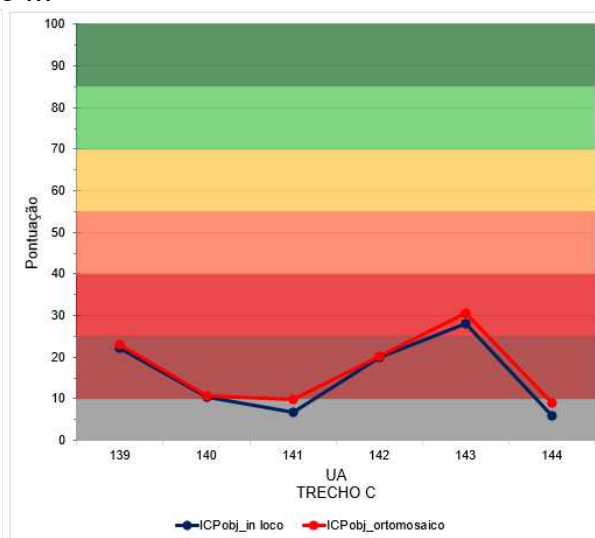
Os gráficos apresentados na Figura 28 mostram a pontuação do ICP atribuída para cada UA dos trechos analisados.

Observa-se uma certa sobreposição entre as curvas, o que indica uma aproximação entre os valores obtidos nas avaliações objetivas realizadas *in loco* e aquelas derivadas da análise por ortomosaicos, sugerindo coerência entre os dois métodos de avaliação.

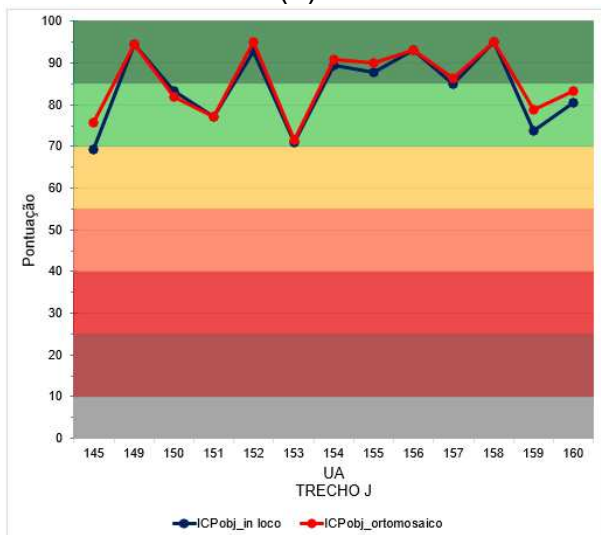
Figura 28 – Pontuação do ICP da Avaliação Objetiva de cada UA (a) trecho B (b) trecho C (c) trecho J (d) trecho K (e) trecho M



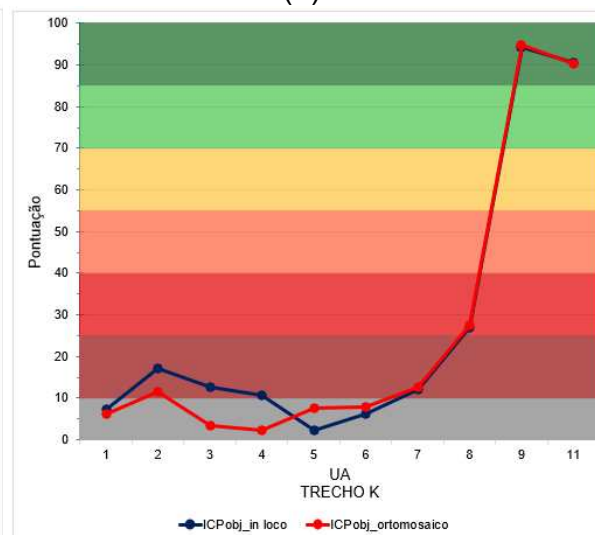
(a)



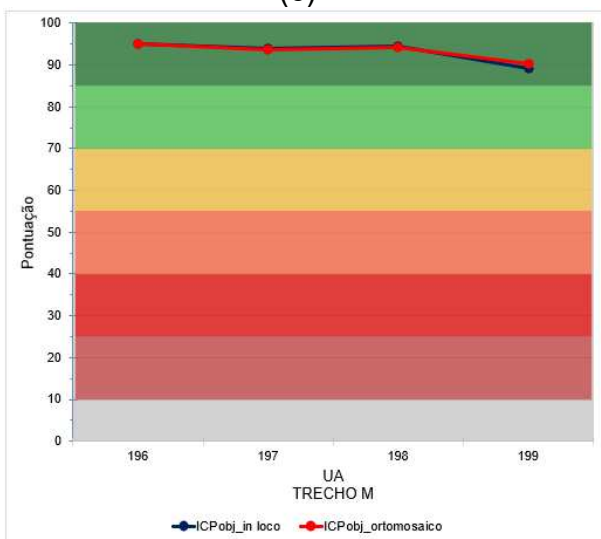
(b)



(c)



(d)



(e)

Legenda

- Excelente
- Muito boa
- Boa
- Regular
- Ruim
- Muito ruim
- Péssima
- ICP Obj_in loco
- ICP Obj_ortomosaico

Essa aproximação os valores de ICP de cada UA refletiu na convergência das avaliações por trecho, como pode ser visto na Tabela 19. No entanto, no trecho J, como muitos valores flutuam perto do limite entre as classificações “muito boa” e “excelente” pequenas variações no valor do ICP das UAs foram suficientes para alterar a classificação final deste trecho.

Tabela 19 - Avaliação objetiva por trecho

Trecho	Nº UAs		Pontuação		Classificação	
	total	com variação	<i>in loco</i>	ortomosaico	<i>in loco</i>	ortomosaico
B	12	0	80,3	80,3	MUITO BOA	MUITO BOA
C	6	0	15,6	17,2	MUITO RUIM	MUITO RUIM
J	14	1	83,8	85,5	MUITO BOA	EXCELENTE
K	11	2	34,0	32,5	RUIM	RUIM
M	4	0	93,2	93,3	EXCELENTE	EXCELENTE

Mesmo o trecho K tendo a maior quantidade de UAs com classificações discrepantes, a média geral do trecho se manteve dentro da classificação “ruim” em ambas as análises.

4.5.1 Testes de hipóteses com os dados da Avaliação Objetiva

Utilizando-se o algoritmo descrito no item 3.9.2.4 obteve-se os seguintes resultados:

i. WILCOXON SIGNED-RANK:

P-valor: 0,056412

Resultado: Não se rejeita H_0

ii. TESTE DOS SINAIS:

P-valor: 0,126289

Resultado: Não se rejeita H_0

iii. TOST COM TESTE DOS SINAIS:

P-valor teste 1: 0,000000

P-valor teste 2: 0,000000

Resultado: Equivalência demonstrada

iv. CORRELAÇÃO DE SPEARMAN:

Correlação de Spearman (ρ): 0,9695

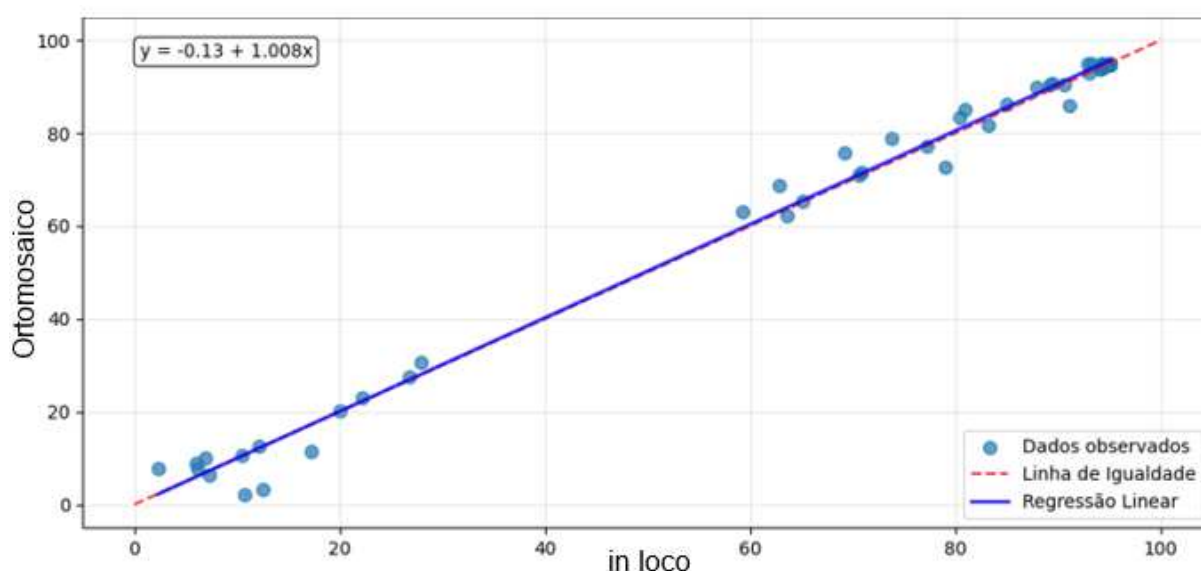
ρ^2 (coeficiente de determinação): 0,9400 (94,00%)

Interpretação: Correlação muito forte

Dos quatro testes aplicados, todos indicaram que há consistência entre os métodos de avaliação subjetiva *in loco* e pela análise dos ortomosaicos.

As Figuras 29, 30 e 31 mostram os gráficos gerados pelo algoritmo.

Figura 29 – Correlação entre os valores da Avaliação Objetiva *in loco* e nos ortomosaicos



Analisando o gráfico apresentado na Figura 29, os resultados demonstram uma correlação forte entre os dois métodos, com um coeficiente de determinação (ρ^2) de 0,9400 e valor ρ de 0,9695, indicando alta significância estatística.

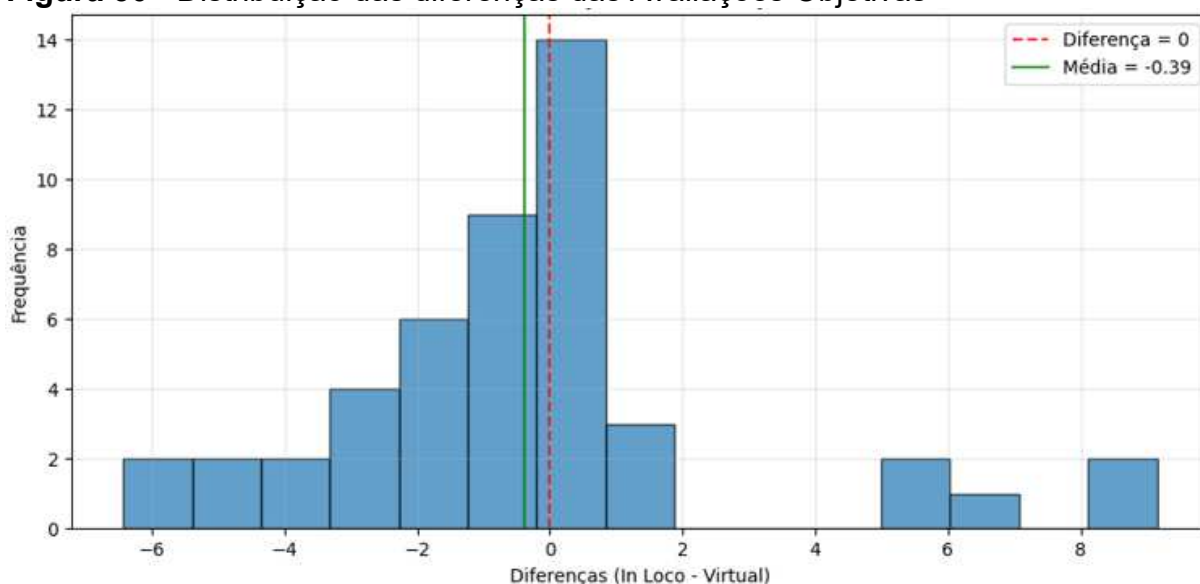
A equação da reta de regressão linear ($y = -0,13 + 1,008x$) revela aspectos positivos sobre a concordância entre os métodos. O coeficiente angular de 1,008 está notavelmente próximo do valor ideal de 1,0, sugerindo que os dois métodos produzem resultados praticamente idênticos em toda a faixa de medição. O intercepto de -0,13 é muito pequeno, indicando a presença mínima de viés sistemático entre os métodos.

A distribuição dos pontos azuis no gráfico, representando os dados observados, segue muito proximamente tanto a linha de regressão linear (linha contínua azul)

quanto a linha de igualdade perfeita (linha tracejada vermelha). Esta proximidade visual confirma o que os coeficientes estatísticos já indicavam. Os poucos pontos que se afastam ligeiramente da linha de regressão podem ser considerados variações normais esperadas em qualquer processo de medição.

Já a Figura 30 demonstra a distribuição das diferenças calculadas subtraindo-se os valores obtidos pelas avaliações dos ortomosaicos dos valores obtidos pela avaliação *in loco*.

Figura 30 - Distribuição das diferenças das Avaliações Objetivas



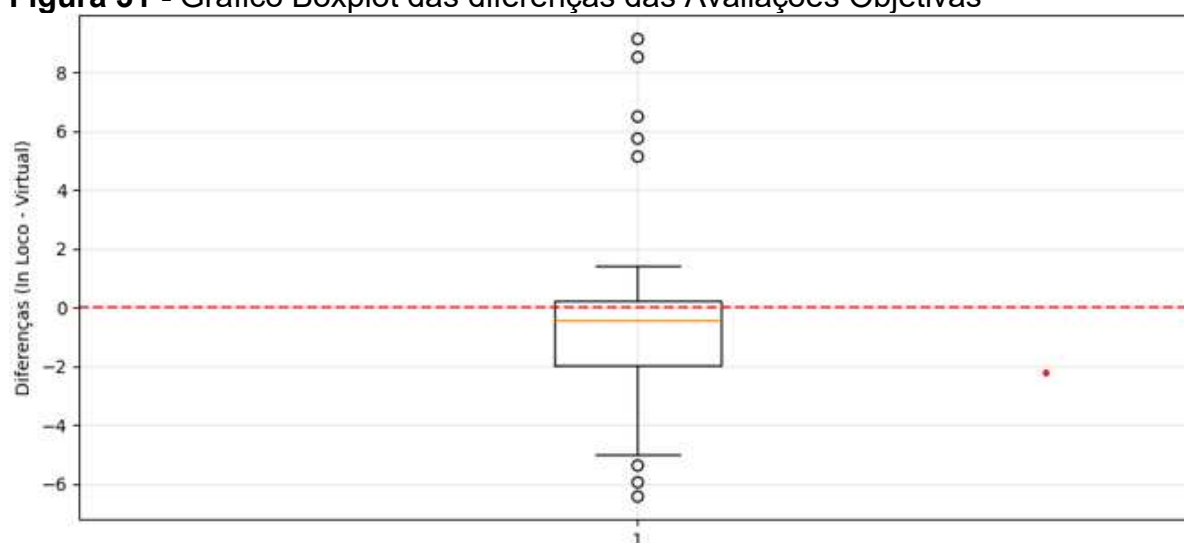
Analisando a Figura 30, observa-se uma distribuição assimétrica à esquerda, com maior concentração de diferenças ligeiramente negativas, o que indica que, na maioria dos casos, os valores obtidos pelo método virtual foram ligeiramente superiores aos valores presenciais, diferente do que ocorreu nas avaliações subjetivas. No entanto, este fator pode ainda estar atrelado a medições da área e o cálculo da densidade.

A linha tracejada vermelha marca a diferença zero, representando o ponto em que ambos os métodos apresentariam resultados idênticos. Já a linha verde indica a média das diferenças, que é de aproximadamente $-0,39$. Esse valor negativo sugere que, em média, os escores do método virtual foram um pouco mais altos do que os do método *in loco*. No entanto, essa diferença é pequena e está centrada próxima de zero, o que é coerente com os testes estatísticos previamente realizados, que não indicaram uma diferença significativa entre os métodos.

A distribuição reforça a noção de que, embora existam variações pontuais, não há uma tendência forte de um método superestimar ou subestimar sistematicamente os resultados em relação ao outro. Assim, o gráfico complementa as análises anteriores, indicando boa concordância entre os métodos de avaliação, com pequenas diferenças individuais, mas sem viés sistemático relevante.

Corroborando com essas análises, o gráfico boxplot apresentado na Figura 31 oferece uma visão complementar e mais detalhada da distribuição analisada no histograma anterior.

Figura 31 - Gráfico Boxplot das diferenças das Avaliações Objetivas



A linha tracejada vermelha representa a linha de referência da diferença zero, ou seja, o ponto em que os dois métodos forneceria resultados idênticos e a caixa central do boxplot está posicionada de forma quase simétrica em torno da linha vermelha tracejada que marca a diferença zero, confirmando a excelente concordância entre os métodos.

A mediana das diferenças está ligeiramente abaixo de zero, o que reforça a observação de que, em média, os valores do método virtual tendem a ser um pouco mais altos do que os obtidos presencialmente. Ainda assim, por estar muito próxima do zero, essa diferença é pequena indicando que metade das observações apresenta diferenças praticamente desprezíveis.

Os bigodes do boxplot se estendem até aproximadamente -5 e +2, definindo os limites para identificação de valores atípicos os "bigodes". Pontos fora desse limite são marcados como *outliers*, tanto positivos quanto negativos. A presença de *outliers* nos dois extremos mostra que houve casos isolados em que a diferença entre os métodos

foi maior do que o esperado, mas esses valores não distorcem significativamente a tendência central do conjunto. A assimetria ligeira observada, com o bigode inferior um pouco mais extenso que o superior, é consistente com a média de -0.39 observada no histograma anterior.

De modo geral, o boxplot corrobora a ideia de que as diferenças entre os métodos são pequenas e centradas próximas de zero, com algumas exceções. Esses resultados são compatíveis com os testes estatísticos anteriores e sugerem boa concordância entre as avaliações presenciais e pelos ortomosaicos.

Portanto, a partir da análise gráfica e estatística, conclui-se que há elevada concordância entre ambos os métodos, não sendo identificada uma diferença sistemática entre as medidas obtidas *in loco* e virtualmente, sugerindo que ambos podem ser utilizados de forma intercambiável com alto grau de confiança.

4.5.2 Fidelidade geométrica dos ortomosaicos

Durante a etapa de geração das imagens com o VPAIPA, foram feitas marcações no pavimento com giz, como descrito no item 4.2.1. Embora essas marcações tenham sido originalmente planejadas para orientar a passagem do equipamento ao longo das UAs, elas também se mostraram úteis para uma etapa adicional do estudo: a verificação da fidelidade geométrica dos ortomosaicos gerados.

Essas linhas funcionaram como marcos de referência espaciais previamente mensurados em campo, possibilitando uma comparação direta com as dimensões observadas nos ortomosaicos. Para isso, foram realizadas medições nos ortomosaicos nos pontos de início, meio e fim de cada UA, com o intuito de verificar se os espaçamentos registrados entre as marcações preservavam os valores reais — os 70 cm entre cada linha de passagem. Como exemplifica a Figura 32 na qual seriam medidas as distâncias entre os pontos 1A e 2A; 3A e 4A; 5A e 6A.

Figura 32 – Pontos de verificação



Com essas três medidas (início, meio e final) de cada uma das 47 UAs utilizou-se o algoritmo descrito no item 3.9.2.4 e obteve-se os resultados mostrados na Tabela 20.

Tabela 20 – Testes de hipóteses das medidas de referência no início, meio e final das UAs

	Início	Meio	Final
Wilcoxon			
p-valor	0,6479	0,6988	0,1572
Resultado	Não rejeita H_0	Não rejeita H_0	Não rejeita H_0
Sinais			
p-valor	1,1321	0,7428	0,7428
Resultado	Não rejeita H_0	Não rejeita H_0	Não rejeita H_0
TOST + Sinais			
p-valor 1	0,0000	0,0000	0,0000
p-valor 2	0,0000	0,0000	0,0000
Resultado	Equivalência	Equivalência	Equivalência

A correlação de Spearman não foi aplicada nesta etapa, uma vez que todos os valores medidos *in loco* corresponderam exatamente a 70 cm, resultando em uma variável com ausência de variabilidade. Nesse cenário, todos os valores do eixo x seriam idênticos, inviabilizando o cálculo do coeficiente de correlação, que requer variabilidade em ambas as variáveis para produzir um resultado significativo.

No teste TOST associado ao teste dos Sinais, o limite de equivalência foi ajustado para 0,005, uma vez que as marcações foram feitas com trena, foi aceita para essa pesquisa uma tolerância de 0,005 m.

Os três testes de hipótese aplicados indicaram que não houve rejeição da hipótese nula, demonstrando equivalência entre os valores comparados, considerando um nível de significância de 0,05. Essa verificação permitiu avaliar a consistência métrica dos ortomosaicos e confirmar a ausência de distorções significativas na escala, o que poderia comprometer a precisão das análises quantitativas. Esses resultados reforçam a confiabilidade dos produtos fotogramétricos utilizados na avaliação da condição dos pavimentos, validando sua aplicação como alternativa viável e precisa ao levantamento *in loco*.

4.6 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O PAIPA mostrou-se promissor para a identificação e medição dos defeitos na superfície do pavimento de forma virtual, no entanto, algumas limitações precisam ser discutidas e estão apresentadas, junto com suas possíveis soluções, na Tabela 21.

Tabela 21 – limitações do PAIPA e propostas para trabalhos futuros

Limitação	Proposta
- Levantamento com o VPAIPA ser feito apenas durante o dia.	- Possibilidade de acoplar holofotes no VPAIPA para permitir levantamentos durante a noite.
- Presença de sombras de arborização e mobiliário urbano no pavimento.	- Fazer levantamento apenas em dias nublados. - Verificar se a colocação de holofotes no VPAIPA minimizaria esses sombreamentos.
- Tempo de levantamento com o VPAIPA	- Possibilidade de colocação de motor substituindo a tração humana.
- Tempo de análise dos ortomosaicos	- Uso de algoritmos de detecção automatizada de imagens.

Por ser um protótipo, o VPAIPA foi construído em madeira, sugere-se para pesquisas futuras a construção com materiais mais leves e de fácil manuseio, como por exemplo barras metálicas.

Além disso, o uso de versões educacionais de *softwares*, como o *iTwin Capture Modeler* empregado nesta pesquisa, pode apresentar certas limitações quanto às funcionalidades disponíveis e à capacidade de processamento. Diante disso, recomenda-se que, em trabalhos futuros, sejam exploradas alternativas com licenças completas ou outros programas que ofereçam maior flexibilidade e recursos avançados, a fim de ampliar o potencial analítico e a qualidade dos produtos gerados.

5 CONCLUSÕES

Com o objetivo de encontrar métodos alternativos para avaliar a condição dos pavimentos, neste trabalho, foi proposto o PAIPA. O método consiste em um conjunto de procedimentos que utilizam imagens (fotos e vídeos) para avaliação de defeitos do pavimento. Durante o desenvolvimento do método, percebeu-se a necessidade de um veículo, para captura das imagens, o VPAIPA. Com as imagens coletadas pelo VPAIPA foi possível gerar modelos tridimensionais de trechos de vias e avaliar a condição do pavimento, identificando virtualmente, os defeitos. O veículo construído mostrou-se eficiente para a manutenção da altura da câmera em relação à superfície do pavimento, fator relevante, uma vez que variações nessa distância influenciam diretamente a sobreposição longitudinal das imagens.

O método desenvolvido foi dividido em duas fases que apresentaram resultados diferentes. Na primeira fase, na qual foram realizados testes pilotos, foram feitas capturas de imagens e vídeos, ambos apresentaram capacidade de gerar representações detalhadas e fielmente escaladas das superfícies avaliadas. No entanto, foi possível perceber que os levantamentos realizados por vídeo apresentaram vantagens operacionais significativas, destacando-se a agilidade na aquisição de dados por eles — cerca de nove vezes mais rápida que por fotografias.

Para o ajustamento do protocolo metodológico proposto, na Fase 2, foram realizadas algumas modificações em relação a Fase 1. Quanto ao levantamento foi escolhido o método de captura por vídeo devido as vantagens operacionais, em especial a agilidade do processo; também foi designada uma marcação no pavimento para manter o mesmo alinhamento do veículo em cada linha de passagem e assim garantir a sobreposição das imagens na etapa de processamento.

No que diz respeito a geração dos modelos, na segunda fase optou-se pela geração de ortomosaicos, associado à malha texturizada, isso porque os ortomosaicos permitem a obtenção de uma representação bidimensional com melhores correção das distorções de perspectiva e de relevo, garantindo a uniformidade de escala em toda a extensão da área analisada. Também, foi feita uma modificação de software de medição e análise dos modelos, em que se deixou de usar o *iTwin Capture Desktop Viewer* pra usar *Autodesk Civil 3D*, devido às limitações de registro e exportação de dados no software utilizado na fase anterior.

Tais decisões contribuíram para a maior agilidade na etapa de análise manual dos modelos gerados, uma vez que o software *Autodesk Civil 3D* possibilita a exportação de dados em formato .xls, incluindo informações relevantes, como o comprimento das linhas e a área dos polígonos. Esse recurso facilitou a tabulação dos defeitos e a posterior aplicação desses dados em análises estatísticas.

Vale ressaltar, que a ideia inicial era associar aos ortomosaicos gerados à nuvem de pontos, para possibilitar a medição da profundidade de defeitos como buracos, no entanto, por possíveis limitações da versão estudantil do software de modelagem utilizado e também por possíveis incompatibilidades deste software com o programa *Autodesk Civil 3D*, não foi possível a utilização da nuvem de pontos. Assim, para locais em que a profundidade era necessária ser medida, ainda foi utilizada a modelagem na forma de malha texturizada (*3D mesh*).

Para testar o procedimento proposto, tanto na Fase 1 como na 2, a avaliação da condição dos pavimentos foi conduzida por meio de abordagens subjetivas e objetivas, tanto *in loco* quanto por meio de virtual permitindo uma análise comparativa abrangente. Os resultados de ambas as fases revelaram forte correlação entre os métodos da avaliação do pavimento (*in loco* x virtual), além de evidências estatísticas de equivalência, conforme demonstrado pelos testes aplicados. Na Fase 2, devido ao aprofundamento do método, foi possível realizar a verificação da fidelidade métrica dos ortomosaicos, baseada em marcações previamente realizadas no pavimento, o que também confirmou a ausência de distorções significativas de escala, reforçando a confiabilidade dos produtos gerados.

Assim, o PAIPA mostrou-se promissor para a identificação e medição dos defeitos na superfície do pavimento de forma virtual, no entanto, algumas limitações precisam ser apontadas, tais como o fato de o tempo de levantamento em campo que não se mostrou tão reduzido em relação ao método tradicional, assim como o tempo de processamento dos dados bem como o grande volume de dados a serem processados. Outra questão foi que não foi obtido ganho significativo de tempo na análise dos defeitos que foi realizada medindo-se os defeitos encontrados nos modelos de forma manual utilizando o software.

Algumas alternativas a estas limitações mencionadas podem ser a adição de um motor ao VPAIPA de modo a automatizar o processo de coleta de dados, bem como a utilização de algoritmos de detecção automática de imagens, capazes de identificar e medir defeitos diretamente nos modelos digitais.

Dessa forma, conclui-se que a integração de técnicas de fotogrametria com modelagem 3D aplicada à gestão da infraestrutura viária representa uma estratégia promissora, contribuindo para a modernização dos processos de diagnóstico e manutenção de pavimentos urbanos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLINGE, S. S; GUPTA, A. K. Deterioração do pavimento e suas causas. *Int. J. Inov. Res. Desv.* **2013**,2, 437–450.

ANDRADE, S., FERREIRA, J., RODRIGUES, M. "Remote Monitoring of Pavements Using Drones and Photogrammetry for Continuous Maintenance Assessment." *Automation in Construction*, 120, 103245, 2022.

ANTHROPIC. Claude. Versão Sonnet 4. San Francisco: Anthropic, 2024. Disponível em: <https://claude.ai>. Acesso em: junho de 2025.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D6433-09: Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys, 2009.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D6433-24: Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys, 2024.

ASTOR, Y. et al. Unmanned aerial vehicle implementation for pavement condition survey. **Transportation Engineering**, v. 12, n. March, p. 100168, 2023.

ATENCIO, E., et al. Calibration of UAV flight parameters for pavement pothole detection using orthogonal arrays. **Automation in Construction**, v. 143, 1 nov. 2022.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento DNIT 006/2003 – PRO. Rio de Janeiro: IPT, 2003a.

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

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de Gerência de Pavimentos. Pub. IPR-745. Rio de Janeiro, 2011.

EISENBACH, M. et al. How to get pavement distress detection ready for deep learning? A systematic approach. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, 2017, AK, USA. p. 2039–2047.

FARASHAH, M. K.; TIGHE, S. L. Development practices for Municipal Pavement Management Systems Application. In: CONFERENCE OF THE TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA, 2014, Montreal, Quebec. Anais [...]. p. 1–20.

GOLABI, K.; KULKARNI, RB; WAY, GB. A Statewide Pavement Management System. **Interfaces**, 1982,12, 5–21.

GOMES, F., SOUZA, L., COSTA, R.. Integration of Photogrammetry in Pavement Management Systems for Efficient Road Maintenance. **International Journal of Pavement Research and Technology**, 13(2), 101-109, 2020.

GUPTA, A.; RASTOGI, R. A critical review of flexible pavement performance models developed for Indian perspective. KSCE18, 1455–1462, 2014.

HADJIDEMETRIOU, G. M.; VELA, P. A.; CHRISTODOULOU, S. E. Automated Pavement Patch Detection and Quantification Using Support Vector Machines. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 32, n. 1, p. 1–11, 2018.

HAN, J., ZHANG, W., E LIU, Y. Application of Deep Learning for Pavement Condition Assessment Using Aerial Imagery. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 29, n.1, 54-67, 2023.

Kulkarni, R.B; Miller, R.W.. Pavement Management Systems: Past, Present, and Future. **Transportation Research Record**, v. 1853, n. 1, 2003.

LEE, S., PARK, K., & YOON, S.. Using Drone Imagery and Deep Learning for Pavement Crack Detection. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 25, n.3, 213-227, 2024.

Li, H., Sun, Y., & Zhang, J.. Emerging trends in pavement evaluation: From manual to automated systems. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v.16, n.1, 45-60, 2023.

LIU, X., ZHAO, P., & WU, M.. AI-driven analysis in pavement distress detection: A

hybrid approach. **Computers in Civil Engineering**, v.38, n.3, 15-30, 2024.

LU, Y. et al. Image-based 3D reconstruction for Multi-Scale civil and infrastructure Projects: A review from 2012 to 2022 with new perspective from deep learning methods. **Advanced Engineering Informatics**, v. 59, 2024.

PAN, Y. et al. Monitoring Asphalt Pavement Aging and Damage Conditions from Low-Altitude UAV Imagery Based on a CNN Approach. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 47, n. 3, p. 432–449, 2021.

Peraka, NSP; Biligiri, KP Pavement asset management systems and technologies: A review. **Automation in Construction**, v.119, n. 3, 103336, 2020.

PROSSER-CONTRERAS, M. et al. Use of unmanned aerial vehicles (Uavs) and photogrammetry to obtain the international roughness index (iri) on roads. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 24, p. 1–22, 2020.

SAAD, A. M.; TAHAR, K. N. Identification of rut and pothole by using multirotor unmanned aerial vehicle (UAV). **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 137, p. 647–654, 2019.

SALVIATTO, V. H. **Ferramenta de avaliação da condição de pavimentos flexíveis urbanos baseada em uma análise multicritério**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

SANTOS, A., SILVA, P., LIMA, T. Advances in Pavement Management through Photogrammetric Techniques. **Transportation Infrastructure Journal**, v. 45, n. 5, 220-232, 2023.

SANTOS, J.; FERREIRA, A. Pavement Design Optimization Considering Costs and Preventive Interventions. **Journal of Transportation Engineering**, v. 138, 911–923, 2012.

SCHNEBELE, E.; CERVONE, G.; WATERS, N. Review of remote sensing methodologies for pavement management and assessment. **European Transport Research Review**, v.7, 2015.

SHI, L., YANG, X., & WANG, R.. Advances in pavement condition assessment technologies. **Journal of Transportation Engineering**, v. 149, n.2, 2023.

SHOLEVAR, N.; GOLROO, A.; ESFAHANI, S. R. Machine learning techniques for pavement condition evaluation. **Automation in Construction**, v. 136, n. November 2021, p. 104190, 2022.

SHOLEVAR, P., GOLROO, A., ESFAHANI, M. Application of Photogrammetry in Pavement Defect Detection and Assessment. **Journal of Pavement Engineering**, , v.32, n.4, 123-135, 2022.

SHOLEVAR, S., GOLROO, A.; ESFAHANI, H. R. Photogrammetry-based pavement condition assessment: Manual and automated approaches. **Automation in Construction**, v. 135, 2022.

TAN, Y., LI, Y. UAV photogrammetry-based 3D road distress detection. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 9, 2019.

TSAI, Y.-C.; KAUL, V., MERSEREAU, R.M. Critical Assessment of Pavement Distress Segmentation Methods. **Journal of Transportation Engineering**, v.136, n. 1, 11–19, 2010

Wolters, M. C., Alavi, S., & Morlok, J. (2019). Data quality and integration in pavement management systems: Emerging tools.

Xu, B., & Zhang, Z. (2021). "AI in Pavement Management: Trends and Challenges." *Journal of Infrastructure Systems*.

ZANCHETTA, F. **Sistemas de Gerência de Pavimentos Urbanos: Avaliação de Campo, Modelo de Desempenho e Análise Econômica**. 2017. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 2017.

ZHANG, J., WANG, M., Li, Q. Development of Hybrid Systems for Pavement Condition Monitoring Using Photogrammetry. **Computers and Geotechnics**, v.92, 15-25, 2021.

APÊNDICE A – ALGORITIMO

```

import numpy as np
import scipy.stats as stats from scipy.stats import wilcoxon, binomtest
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns from typing import Tuple

# Dados fornecidos
in_loco = np.array([****INSERIR OS DADOS****])
virtual = np.array([****INSERIR OS DADOS****])

# Cálculo das diferenças
diff = in_loco - virtual

# ANÁLISE DE CORRELAÇÃO (SPEARMAN)
print("="*60)
print("ANÁLISE DE CORRELAÇÃO (SPEARMAN)")
print("="*60)

# Correlação de Spearman (não paramétrica)
correlation_spearman, p_spearman = stats.spearmanr(in_loco, virtual)
r_squared_spearman = correlation_spearman**2

# Regressão linear para linha de tendência
slope, intercept, r_value, p_val_reg, std_err = stats.linregress(in_loco, virtual)

print(f"CORRELAÇÃO DE SPEARMAN (não paramétrica):")
print(f" ρ (rho) = {correlation_spearman:.4f}")
print(f" ρ² = {r_squared_spearman:.4f} ({r_squared_spearman*100:.2f}%)")
print(f" P-valor = {p_spearman:.6f}")
print(f"\nREGRESSÃO LINEAR (para linha de tendência):")
print(f" Equação: Virtual = {intercept:.4f} + {slope:.4f} × In_Loco")
print(f" R² = {r_value**2:.4f}")
print(f" Erro padrão = {std_err:.4f}")

```

```

print(f" P-valor = {p_val_reg:.6f}")

# Interpretação do  $\rho^2$ 
if r_squared_spearman >= 0.90:
    interpretacao_spearman = "Correlação muito forte"
elif r_squared_spearman >= 0.70:
    interpretacao_spearman = "Correlação forte"
elif r_squared_spearman >= 0.50:
    interpretacao_spearman = "Correlação moderada"
elif r_squared_spearman >= 0.30:
    interpretacao_spearman = "Correlação fraca"
else: interpretacao_spearman = "Correlação muito fraca"

print(f"\nINTERPRETAÇÃO DO  $\rho^2$  (Spearman):")
print(f" {interpretacao_spearman}")
print(f" {r_squared_spearman*100:.2f}% da variação no ranking dos dados é
explicada pela correlação monotônica")

print("\n" + "="*60)
print("ANÁLISE DE DADOS PAREADOS NÃO PARAMÉTRICOS")
print("="*60)
print(f"Número de pares: {len(diff)}")
print(f"Diferenças nulas (empates): {np.sum(diff == 0)}")
print(f"Diferenças positivas: {np.sum(diff > 0)}")
print(f"Diferenças negativas: {np.sum(diff < 0)}")
print(f"Média das diferenças: {np.mean(diff):.4f}")
print(f"Mediana das diferenças: {np.median(diff):.4f}")
print(f"Desvio padrão das diferenças: {np.std(diff):.4f}")

# 1. TESTE DE WILCOXON SIGNED-RANK
print("\n" + "="*60)
print("1. TESTE DE WILCOXON SIGNED-RANK")
print("="*60)

```

```

# Executa o teste (automaticamente remove empates)
statistic_w, p_value_w = wilcoxon(diff, alternative='two-sided')

print(f"Estatística W: {statistic_w}")
print(f"P-valor: {p_value_w:.6f}")
print(f"Nível de significância:  $\alpha = 0.05$ ")

if p_value_w < 0.05:    print("RESULTADO: Rejeita H0 - Há diferença significativa
entre os grupos")
else:    print("RESULTADO: Não rejeita H0 - Não há evidência de diferença
significativa")

print(f"\nInterpretação:")
print(f"H0: A mediana das diferenças = 0")
print(f"H1: A mediana das diferenças  $\neq 0$ ")
print(f"Empates foram automaticamente removidos da análise")

# 2. TESTE DOS SINAIS (SIGN TEST)
print("\n" + "="*60)
print("2. TESTE DOS SINAIS (SIGN TEST)")
print("="*60)

# Remove empates para o teste dos sinais
diff_no_ties = diff[diff != 0]
n_no_ties = len(diff_no_ties)
n_positive = np.sum(diff_no_ties > 0)
n_negative = np.sum(diff_no_ties < 0)

print(f"Pares sem empates: {n_no_ties}")
print(f"Diferenças positivas: {n_positive}")
print(f"Diferenças negativas: {n_negative}")

# Teste bilateral usando distribuição binomial
# Sob H0: P(positivo) = P(negativo) = 0.5

```

```
p_value_sign = 2 * min (stats.binom.cdf(n_positive, n_no_ties, 0.5),
stats.binom.cdf(n_negative, n_no_ties, 0.5))
```

```
print(f"P-valor: {p_value_sign:.6f}")
```

```
print(f"Nível de significância:  $\alpha = 0.05$ ")
```

```
if p_value_sign < 0.05: print("RESULTADO: Rejeita H0 - Há diferença significativa
entre os grupos")
```

```
else: print("RESULTADO: Não rejeita H0 - Não há evidência de diferença
significativa")
```

```
print(f"\nInterpretação:")
```

```
print(f"H0: P(in_loco > virtual) = P(in_loco < virtual) = 0.5")
```

```
print(f"H1: P(in_loco > virtual)  $\neq$  P(in_loco < virtual)")
```

```
print(f"Mais robusto para empates que o teste de Wilcoxon")
```

3. TESTE TOST COM TESTE DOS SINAIS

```
print("\n" + "="*60)
```

```
print("3. TESTE TOST COM TESTE DOS SINAIS")
```

```
print("="*60)
```

```
def sign_test_one_sided(diff_data, alternative='greater'):
```

```
    """
```

```
    Executa teste dos sinais unilateral
```

```
    alternative: 'greater' ou 'less'
```

```
    """
```

```
    diff_no_ties = diff_data[diff_data != 0]
```

```
    n = len(diff_no_ties)
```

```
    n_positive = np.sum(diff_no_ties > 0)
```

```
    if alternative == 'greater':
```

```
        # H1: P(positivo) > 0.5
```

```
        p_val = 1 - stats.binom.cdf(n_positive - 1, n, 0.5)
```

```
    else: # alternative == 'less'
```

```

# H1: P(positivo) < 0.5
p_val = stats.binom.cdf(n_positive, n, 0.5)
return p_val

def tost_sign_test(data1, data2, delta_lower=-1.0, delta_upper=1.0, alpha=0.05):
    """
    TOST usando teste dos sinais
    Para dados pareados, testa se a diferença está dentro do intervalo de equivalência
    """
    diff = data1 - data2

    print(f"Limites de equivalência: [{delta_lower:.2f}, {delta_upper:.2f}]")
    print(f"Nível de significância:  $\alpha = {alpha}$ ")

    # Teste 1: H0: diferença  $\leq$  delta_lower vs H1: diferença > delta_lower
    diff_1 = diff - delta_lower
    p_value_1 = sign_test_one_sided(diff_1, alternative='greater')

    # Teste 2: H0: diferença  $\geq$  delta_upper vs H1: diferença < delta_upper
    diff_2 = diff - delta_upper
    p_value_2 = sign_test_one_sided(diff_2, alternative='less')

    print(f"\nTeste 1 (H0: mediana_diff  $\leq$  {delta_lower}):")
    print(f"P-valor: {p_value_1:.6f}")

    print(f"\nTeste 2 (H0: mediana_diff  $\geq$  {delta_upper}):")
    print(f"P-valor: {p_value_2:.6f}")

    # TOST: ambos os testes devem ser significativos
    tost_significant = (p_value_1 < alpha) and (p_value_2 < alpha)

    print(f"\nRESULTADO TOST:")
    if tost_significant:
        print("EQUIVALÊNCIA ESTATÍSTICA DEMONSTRADA")

```

```

    print("Os grupos são estatisticamente equivalentes dentro dos limites definidos")
else:
    print("EQUIVALÊNCIA NÃO DEMONSTRADA")
    print("Não há evidência suficiente de equivalência estatística")
    return p_value_1, p_value_2, tost_significant

# Definindo limites de equivalência
# Ajustado para ±10 conforme solicitado
mean_abs_diff = np.mean(np.abs(diff))
delta_lower = -10.0 # Limite inferior ajustado
delta_upper = 10.0 # Limite superior ajustado

print(f"Média das diferenças absolutas: {mean_abs_diff:.4f}")
print(f"Sugestão de limites baseados nos dados: ±{mean_abs_diff:.2f}")

# Executa TOST
p1, p2, is_equivalent = tost_sign_test(in_loco, virtual, delta_lower, delta_upper)

# 4. VISUALIZAÇÕES COM CORRELAÇÃO DE SPEARMAN
print("\n" + "="*60)
print("4. VISUALIZAÇÕES COM CORRELAÇÃO DE SPEARMAN")
print("="*60)

# Configuração dos gráficos
plt.style.use('default')
fig, axes = plt.subplots(2, 2, figsize=(15, 12))
fig.suptitle('Análise de Dados Pareados: In Loco vs Virtual', fontsize=16,
fontweight='bold')

# Gráfico 1: Scatter plot com linha de regressão e correlação de Spearman
axes[0,0].scatter(in_loco, virtual, alpha=0.7, s=50, label='Dados observados')
axes[0,0].plot([0, 100], [0, 100], 'r--', alpha=0.8, label='Linha de Igualdade')

# Adicionar linha de regressão

```

```

x_line = np.linspace(min(in_loco), max(in_loco), 100)
y_line = slope * x_line + intercept
axes[0,0].plot(x_line, y_line, 'b-', alpha=0.8, linewidth=2, label='Regressão Linear')

axes[0,0].set_xlabel('In Loco')
axes[0,0].set_ylabel('Virtual')
axes[0,0].set_title(f'Correlação entre Métodos\n $\rho^2 = \{r\_squared\_spearman:.4f\} \mid \rho = \{correlation\_spearman:.4f\}$ ')
axes[0,0].legend()
axes[0,0].grid(True, alpha=0.3)

# Adicionar texto com equação da regressão
equation_text = f'y = {intercept:.2f} + {slope:.3f}x'
axes[0,0].text(0.05, 0.95, equation_text, transform=axes[0,0].transAxes,
              bbox=dict(boxstyle="round,pad=0.3", facecolor="white", alpha=0.8),
              verticalalignment='top', fontsize=10)

# Gráfico 2: Histograma das diferenças
axes[0,1].hist(diff, bins=15, alpha=0.7, edgecolor='black')
axes[0,1].axvline(0, color='red', linestyle='--', alpha=0.8, label='Diferença = 0')
axes[0,1].axvline(np.mean(diff), color='green', linestyle='-', alpha=0.8, label=f'Média = {np.mean(diff):.2f}')
axes[0,1].set_xlabel('Diferenças (In Loco - Virtual)')
axes[0,1].set_ylabel('Frequência')
axes[0,1].set_title('Distribuição das Diferenças')
axes[0,1].legend()
axes[0,1].grid(True, alpha=0.3)

# Gráfico 3: Boxplot das diferenças
axes[1,0].boxplot(diff, vert=True)
axes[1,0].axhline(0, color='red', linestyle='--', alpha=0.8)
axes[1,0].set_ylabel('Diferenças (In Loco - Virtual)')
axes[1,0].set_title('Boxplot das Diferenças')
axes[1,0].grid(True, alpha=0.3)

```

```
plt.tight_layout()
```

```
plt.show()
```

5. RESUMO DOS RESULTADOS

```
print("\n" + "="*60)
```

```
print("5. RESUMO DOS RESULTADOS")
```

```
print("="*60)
```

```
print(f"CORRELAÇÃO DE SPEARMAN:")
```

```
print(f" Correlação de Spearman ( $\rho$ ): {correlation_spearman:.4f}")
```

```
print(f"  $\rho^2$  (coeficiente de determinação): {r_squared_spearman:.4f}
({r_squared_spearman*100:.2f}%)")
```

```
print(f" Interpretação: {interpretacao_spearman}")
```

```
print(f"\n1. WILCOXON SIGNED-RANK:")
```

```
print(f" P-valor: {p_value_w:.6f}")
```

```
print(f" Resultado: {'Diferença significativa' if p_value_w < 0.05 else 'Sem diferença
significativa'}")
```

```
print(f"\n2. TESTE DOS SINAIS:")
```

```
print(f" P-valor: {p_value_sign:.6f}")
```

```
print(f" Resultado: {'Diferença significativa' if p_value_sign < 0.05 else 'Sem diferença
significativa'}")
```

```
print(f"\n3. TOST COM TESTE DOS SINAIS:")
```

```
print(f" P-valor teste 1: {p1:.6f}")
```

```
print(f" P-valor teste 2: {p2:.6f}")
```

```
print(f" Resultado: {'Equivalência demonstrada' if is_equivalent else 'Equivalência não
demonstrada'}")
```

```
print(f"\n" + "="*60)
```