



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

LARISSA DE ABREU GIMENES

**FOTOGRAMETRIA À CURTA DISTÂNCIA COM USO DE
SMARTPHONE PARA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS URBANOS**

Londrina
2025

LARISSA DE ABREU GIMENES

**FOTOGRAMETRIA À CURTA DISTÂNCIA COM USO DE
SMARTPHONE PARA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS URBANOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Heliana Barbosa Fontenele

Londrina
2025

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

G491 Gimenes, Larissa de Abreu.
Fotogrametria à Curta Distância com uso de Smartphone para Avaliação da Condição de Pavimentos Flexíveis Urbanos / Larissa de Abreu Gimenes. - Londrina, 2025.
118 f. : il.

Orientador: Heliana Barbosa Fontenele.
Dissertação (Mestrado 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. Ortomosaico - Tese. 3. Modelo 3D - Tese. 4. Smartphone - Tese. I. Fontenele, Heliana Barbosa. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 62

LARISSA DE ABREU GIMENES

**FOTOGRAMETRIA À CURTA DISTÂNCIA COM USO DE
SMARTPHONE PARA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS URBANOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Heliana Barbosa Fontenele
Universidade Estadual de Londrina – UEL
Orientadora

Prof. Dr. Thiago Botion Neri
Universidade Estadual de Maringá - UEM

Prof.^a Dr.^a Shirley Minnell Ferreira de Oliveira
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Londrina, 21 de fevereiro de 2025.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela minha vida, por ter permitido que eu tivesse saúde e determinação para não desanimar durante a realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela disponibilização da bolsa de mestrado.

À Universidade Estadual de Londrina, ao Centro de Tecnologia e Urbanismo, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e ao Laboratório de Engenharia de Transportes, pela infraestrutura e apoio institucional. Agradeço também a todos os professores pelos ensinamentos fundamentais para minha formação.

À minha orientadora, professora Dra. Heliana Barbosa Fontenele, por sua orientação, ensinamentos e confiança depositada em mim desde a iniciação científica na graduação. A sua dedicação e incentivo foram essenciais para a concretização deste trabalho.

Aos alunos de graduação e pós-graduação em engenharia civil, pela colaboração e disposição durante o processo de obtenção de dados, contribuindo significativamente para o desenvolvimento deste estudo.

À minha irmã e amigos, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade, pelo apoio e por toda compreensão ao longo desta caminhada.

Ao meu namorado, Vinicius, por todo amor, incentivo e força nos momentos de desânimo e cansaço, por me lembrar diariamente que sou capaz e por seu apoio incondicional. Por sempre estar disposto a me ajudar quando solicitado, mesmo não sendo da área, sua ajuda foi essencial para este trabalho.

Aos meus pais, por guiarem meus passos no caminho certo, pelo apoio incondicional e por não medirem esforços para que eu receba uma boa educação e alcance meus objetivos. Também agradeço por terem me acompanhado durante a coleta de dados deste estudo, tornando essa etapa ainda mais especial.

RESUMO

GIMENES, Larissa de Abreu. **Fotogrametria à Curta Distância com uso de Smartphone para Avaliação da Condição de Pavimentos Flexíveis Urbanos.** 2025. 118 f. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2025.

A manutenção da infraestrutura viária é fundamental para garantir segurança, mobilidade e eficiência na alocação de recursos públicos. No Brasil, a gestão dos pavimentos urbanos enfrenta desafios, resultando em superfícies deterioradas e altos custos de reabilitação. Métodos tradicionais de avaliação, como inspeções manuais, são frequentemente subjetivos e demorados. Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo avaliar a aplicabilidade de um método fotogramétrico para a avaliação da condição da superfície de pavimentos flexíveis urbanos, utilizando *smartphone* na coleta de dados. Para isso, foram definidas e testadas metodologias de aquisição e processamento de imagens, utilizando um *smartphone* acoplado a um protótipo de captura para a geração de modelos tridimensionais e ortomosaicos no software *iTwin Capture Modeler*. Os dados extraídos desses modelos foram comparados com levantamentos tradicionais, permitindo a validação da técnica proposta e a análise da eficácia de diferentes formas de captura, como fotografias e vídeos. A metodologia foi aplicada em trechos selecionados do campus da Universidade Estadual de Londrina. A avaliação da condição das vias foi realizada de forma subjetiva e objetiva, comparando os resultados obtidos por inspeção visual *in loco* com aqueles derivados da análise dos produtos fotogramétricos. Os resultados indicaram alta precisão na reconstrução das superfícies e na identificação de defeitos, permitindo a extração de métricas detalhadas sobre sua extensão e severidade. A análise comparativa revelou uma forte correlação entre os dados obtidos pelos modelos fotogramétricos e aqueles levantados manualmente, evidenciando a confiabilidade da técnica. Além disso, os modelos 3D e ortomosaicos gerados demonstraram o potencial do método para substituir ou complementar as inspeções convencionais, proporcionando medições detalhadas, reproduzíveis e de menor custo, destacando-se como uma solução promissora para o gerenciamento de pavimentos urbanos. Desse modo, a abordagem fotogramétrica baseada em *smartphones* é uma solução inovadora, acessível e eficiente para a avaliação de pavimentos urbanos, oferecendo uma alternativa prática à metodologia convencional, resultando em um gerenciamento mais eficaz da infraestrutura urbana.

Palavras-chave: Infraestrutura urbana; Ortomosaico; Modelo 3D; *Smartphone*.

ABSTRACT

GIMENES, Larissa de Abreu. **Close-Range Photogrammetry Using Smartphones for Evaluating the Condition of Urban Flexible Pavements**. 2025. 118 s. Master Thesis (Masters in Civil Engineering) - Londrina State University, Londrina, 2025.

The maintenance of road infrastructure is essential to ensure safety, mobility, and efficiency in the allocation of public resources. In Brazil, the management of urban pavements faces challenges, resulting in deteriorated surfaces and high rehabilitation costs. Traditional assessment methods, such as manual inspections, are often subjective and time-consuming. Given this scenario, this study aims to evaluate the applicability of a photogrammetric method for assessing the surface condition of urban flexible pavements, using a smartphone for data collection. To achieve this, methodologies for image acquisition and processing were defined and tested, using a smartphone mounted on a capture prototype to generate three-dimensional models and orthomosaics in the iTwin Capture Modeler software. The data extracted from these models were compared with traditional surveys, allowing for the validation of the proposed technique and the analysis of the effectiveness of different capture methods, such as photographs and videos. The methodology was applied to selected sections of the State University of Londrina campus. The pavement condition assessment was conducted both subjectively and objectively, comparing the results obtained through on-site visual inspection with those derived from the analysis of photogrammetric products. The results indicated high accuracy in surface reconstruction and defect identification, enabling the extraction of detailed metrics regarding their extent and severity. Comparative analysis revealed a strong correlation between the data obtained from photogrammetric models and those collected manually, demonstrating the reliability of the technique. Additionally, the generated 3D models and orthomosaics showcased the method's potential to replace or complement conventional inspections, providing detailed, reproducible, and cost-effective measurements, standing out as a promising solution for urban pavement management. Thus, the smartphone-based photogrammetric approach presents itself as an innovative, accessible, and efficient solution for urban pavement evaluation, offering a practical alternative to conventional methodologies and leading to more effective urban infrastructure management.

Keywords: Urban Infrastructure; Orthomosaic; 3D Model; Smartphone.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Classificação da condição do pavimento de acordo com o PCI ...	25
Figura 2.2 – Matriz de valores fixos	26
Figura 2.3 – Planilha para avaliação da condição dos pavimentos.....	29
Figura 2.4 – Avaliação da condição do pavimento como indicador no tipo de manutenção.....	29
Figura 3.1 – Sobreposição lateral e longitudinal em voos fotogramétricos	33
Figura 4.1 – Fluxograma do método de pesquisa	38
Figura 4.2 – Cidade de Londrina com destaque para o campus UEL	39
Figura 4.3 – Mapa de divisão do campus em trechos	40
Figura 4.4 – Localização da unidade piloto	41
Figura 4.5 – Localização da área de estudo.....	41
Figura 4.6 – Visão aérea das vias selecionadas para estudo	42
Figura 4.7 – Visão interna das vias selecionadas para estudo	43
Figura 4.8 – Protótipo VPAIPA com o smartphone acoplado.....	44
Figura 4.9 – Campo de visão horizontal e vertical.....	46
Figura 4.10 – Marcação das linhas de passagem	48
Figura 4.11 – Procedimento de coleta de imagens (foto).....	49
Figura 4.12 – Procedimento de coleta de imagens (vídeo)	50
Figura 4.13 – Marcações das linhas de passagem	51
Figura 4.14 – Etapas para a produção de modelo 3D e ortomosaico no <i>iTwin</i> <i>Capture Modeler</i>	52
Figura 4.15 – Interface inicial do <i>iTwin Capture Modeler</i>	54
Figura 4.16 – Pontos de amarração para definição de escala.....	54
Figura 4.17 – Reconstrução modelo e ortomosaico.....	55
Figura 4.18 – Interface <i>iTwin Manage And Extract</i>	56
Figura 4.19 – Interface AutoCAD.....	58
Figura 4.20 – Cores diferenciadas por tipo e severidade do defeito	59
Figura 4.21 – Formulário para avaliação subjetiva.....	61
Figura 4.22 – Formulário para avaliação subjetiva por meio de imagens	62
Figura 4.23 – Continuação do formulário para avaliação subjetiva.....	63
Figura 5.1 – Exemplo de visualização dos modelos 3D: Aceito A); Rejeitado B)	74

Figura 5.2 – Modelo 3D com identificação de defeitos no <i>iTwin Manage And Extract</i>	78
Figura 5.3 – Exemplo de anotação dos defeitos no <i>software iTwin</i>	78
Figura 5.4 – Ortomosaico UA 144 no <i>software AutoCAD</i>	79
Figura 5.5 – Exemplo de anotação dos defeitos no <i>software AutoCAD</i>	79
Figura 5.6 – Sombras na representação do pavimento no ortomosaico	80
Figura 5.7 – Somatório das dimensões dos defeitos para as medidas <i>in loco</i> , Foto_ <i>iTwin</i> , Foto_ <i>AutoCAD</i> e Vídeo_ <i>AutoCAD</i> na UA 144.....	81
Figura 5.8 – Gráficos de correlação na UA 144: softwares de medição	85
Figura 5.9 – Gráficos de correlação na UA 144: aquisição de imagens	89
Figura 5.10 – Comparação gráfica entre ICPsubj_ <i>in loco</i> e ICPsubj_ <i>imagem</i> no trecho C	91
Figura 5.11 – Boxplot do ICPsubj_ <i>in loco</i> e do ICPsubj_ <i>imagem</i> no trecho C	93
Figura 5.12 – Comparação gráfica para os avaliadores da avaliação subjetiva no trecho C	94
Figura 5.13 – Comparação gráfica entre PCI_ <i>in loco</i> e PCI_ <i>imagem</i> no trecho B ...	97
Figura 5.14 – Comparação gráfica entre PCI_ <i>in loco</i> e PCI_ <i>imagem</i> no trecho C...	98
Figura 5.15 – Boxplots do PCI_ <i>in loco</i> e PCI_ <i>imagem</i> nos trechos B e C	100
Figura 5.16 – Comparação gráfica entre a Área_ <i>in loco</i> e a Área_ <i>imagem</i> nos trechos B e C	104
Figura 5.17 – Ortomosaico com interferências da alça do protótipo e de sombras.....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tipos de defeitos considerados no método do PCI	24
Tabela 4.1 – Especificações da câmera do smartphone Iphone 11	44
Tabela 4.2 – Configurações dos parâmetros de aerotriangulação.....	66
Tabela 5.1 – Resultados do relatório de qualidade do processo de aerotriangulação.....	73
Tabela 5.2 – Análise estatística dos erros do processo de aerotriangulação....	75
Tabela 5.3 – Análise estatística do processo de aerotriangulação: teste de Friedman.....	76
Tabela 5.4 – Análise estatística do processo de aerotriangulação: teste de comparações múltiplas.....	77
Tabela 5.5 – Somatório das dimensões dos defeitos na UA 144: <i>softwares</i> de medição	82
Tabela 5.6 – Teste à normalidade na UA 144: <i>softwares</i> de medição.....	83
Tabela 5.7 – Análise estatística na UA 144: <i>softwares</i> de medição.....	84
Tabela 5.8 – Somatório das dimensões dos defeitos na UA 144: aquisição de imagens	86
Tabela 5.9 – Teste à normalidade na UA 144: aquisição de imagens	87
Tabela 5.10 – Análise estatística na UA 144: aquisição de imagens.....	88
Tabela 5.11 – Estatística descritiva na UA 144: aquisição de imagens.....	89
Tabela 5.12 – Teste t Pareado para ICPsubj_ <i>in loco</i> e ICPsubj_ <i>imagem</i> no trecho C	92
Tabela 5.13 – Teste de normalidade para os avaliadores da avaliação subjetiva no trecho C	95
Tabela 5.14 – Teste t Pareado para os avaliadores da avaliação subjetiva no trecho C	95
Tabela 5.15 – Teste de correlação para os avaliadores da avaliação subjetiva no trecho C	96
Tabela 5.16 – Teste de Friedman para PCI_ <i>in loco</i> e PCI_ <i>imagem</i> no trecho B e C99	
Tabela 5.17 – Classificação da condição do pavimento com base no PCI_ <i>in loco</i> e PCI_ <i>imagem</i> nos trechos B e C	101
Tabela 5.18 – Número de UAs por classificação segundo o PCI_ <i>in loco</i> e o PCI_ <i>imagem</i> nos trechos B e C.....	102

Tabela 5.19 – Média do PCI_ <i>in loco</i> e do PCI_ <i>imagem</i> PCI nos trechos B e C.....	103
Tabela 5.20 – Número de UAs por classificação de intervenção segundo o PCI_ <i>in loco</i> e o PCI_ <i>imagem</i> nos trechos B e C.....	105
Tabela 5.21 – Estratégias de intervenção do PCI_ <i>in loco</i> e do PCI_ <i>imagem</i> nos trechos B e C.....	106
Tabela 5.22 – Estratégias de intervenção do ICPsubj_ <i>in loco</i> e ICPsubj_ <i>imagem</i> no trecho C.....	107

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS.....	13
1.1.1	Objetivo Geral.....	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
1.2	JUSTIFICATIVA.....	14
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	15
2	SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS	16
2.1	VISÃO GERAL.....	16
2.2	AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PAVIMENTOS.....	18
2.2.1	Avaliação Subjetiva	20
2.2.2	Avaliação Objetiva	21
2.3	ÍNDICES DE CONDIÇÃO DE PAVIMENTO.....	22
2.3.1	<i>Pavement Condition Index – PCI</i>	23
2.3.2	Matriz de Valores Fixos - MVF.....	26
2.3.3	Índice de Condição Atual de Pavimentos - ICAP	27
2.3.4	Índice de Condição de Pavimentos – ICPIA.....	28
3	TÉCNICAS DIGITAIS DE COLETA E TRATAMENTO DE DADOS PARA FINS DE SGPU	31
3.1	FOTOGRAMETRIA.....	31
3.1.1	Aquisição de Imagens e o Processo Fotogramétrico	32
3.2	NOVAS TECNOLOGIAS PARA INSPEÇÃO DE PAVIMENTOS.....	34
4	MÉTODO DE PESQUISA.....	38
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	39
4.2	DEFINIÇÃO DE EQUIPAMENTOS E <i>SOFTWARES</i>	43
4.3	AQUISIÇÃO DE IMAGENS.....	46
4.4	PROCESSAMENTO DE IMAGENS.....	51
4.4.1	Calibração de Câmeras	53
4.4.2	Geração do Modelo 3D e do Ortomosaico	53

4.5	OBTENÇÃO DOS DADOS RELATIVOS AOS DEFEITOS NO MODELO 3D E ORTOMOSAICOS	56
4.6	AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DO PAVIMENTO.....	60
4.6.1	Avaliação Subjetiva	60
4.6.2	Avaliação Objetiva	63
4.7	TESTE E VALIDAÇÃO.....	65
4.7.1	Fase I - Parâmetros de Aerotriangulação	65
4.7.2	Fase II - Comparações entre as Dimensões dos Defeitos	67
4.7.3	Fase III – Avaliação da Condição do Pavimento	68
4.7.4	Análise Estatística Usada para Teste e Validação	69
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	72
5.1	TESTE PILOTO	72
5.1.1	Definição dos Parâmetros de Aerotriangulação para Geração dos Modelos 3D – Fase I	72
5.1.2	Análise Comparativa das Dimensões dos Defeitos – Fase II	77
5.2	VALIDAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE PESQUISA.....	90
5.2.1	Análise da Avaliação Subjetiva da Condição do Pavimento.....	91
5.2.2	Análise da Avaliação Objetiva da Condição do Pavimento	97
5.2.3	Comparação das Estratégias de Intervenção	105
5.2.4	Algumas Considerações sobre o Processamento e Geração dos Ortomosaicos	108
6	CONCLUSÕES.....	110
	REFERÊNCIAS.....	112

1 INTRODUÇÃO

As estradas são essenciais para a segurança e mobilidade, além de influenciarem o desenvolvimento econômico e social. Em áreas urbanas, o tráfego intenso agrava o desgaste das superfícies, comprometendo sua durabilidade. No Brasil, a má gestão das rodovias resulta em conservação inadequada e pavimentos de baixa qualidade, elevando custos de manutenção.

Nesse contexto, a avaliação do estado do pavimento é o ponto de partida para determinar os reparos necessários e garantir condições adequadas de tráfego. Tradicionalmente, essa tarefa tem sido realizada por meio de inspeções manuais, um processo que, embora amplamente utilizado, é demorado, subjetivo e suscetível a inconsistências. Para superar essas limitações, tecnologias automatizadas vêm sendo introduzidas, tornando o processo mais eficiente e objetivo.

A implantação de um adequado Sistema de Gerência de Pavimentos Urbanos (SGPU) surge como uma solução viável para esse problema, oferecendo ferramentas de planejamento baseadas na avaliação funcional e estrutural dos pavimentos. Para que os SGPU sejam eficazes, é necessário empregar métodos práticos, ágeis e acessíveis, que permitam a coleta precisa de dados sobre as condições das vias.

Diante disso, para contribuir com a longevidade das infraestruturas, faz-se necessário aprimorar os atuais modelos de gestão de pavimentos. Dentre as abordagens tecnológicas disponíveis, a fotogrametria destaca-se como uma técnica promissora. Ao possibilitar a reconstrução tridimensional detalhada das superfícies por meio de fotografias capturadas no local e processadas em *softwares* especializados, a fotogrametria permite uma representação precisa das condições do pavimento, facilitando a identificação e classificação de defeitos.

De tal forma, o uso de *smartphones* para a captura de imagens surge como alternativa devido ao seu custo reduzido e à facilidade de operação, apresentando-se como uma opção prática e acessível para aplicações fotogramétricas. Isso se deve ao fato de que suas câmeras digitais têm um custo consideravelmente menor em comparação com equipamentos fotográficos dedicados a imagens aéreas.

Este trabalho parte da hipótese de que a fotogrametria à curta distância, utilizando *smartphones*, pode oferecer uma solução viável e eficaz para a avaliação da condição de pavimentos urbanos. A proposta explora o potencial dessa técnica como alternativa prática e acessível para captar e analisar dados de pavimentos, integrando tecnologias disponíveis para gerar produtos fotogramétricos e mensurar defeitos com precisão. Dessa forma, busca-se contribuir para a otimização dos processos de gestão e manutenção da infraestrutura viária em ambientes urbanos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a aplicabilidade de um método fotogramétrico para a avaliação da condição da superfície de pavimentos flexíveis urbanos, utilizando *smartphone* na coleta de dados.

1.1.2 Objetivos Específicos

Com a finalidade de atingir o objetivo geral, fazem-se necessários os seguintes objetivos específicos:

- Investigar os parâmetros que influenciam a qualidade do processo de aerotriangulação em levantamentos fotogramétricos para avaliação de pavimentos urbanos;
- Comparar a eficiência e qualidade da coleta de imagens por meio de fotografias e vídeos no contexto da fotogrametria aplicada aos pavimentos urbanos;
- Avaliar a precisão e usabilidade dos *softwares iTwin* e AutoCAD aplicados aos modelos 3D e ortomosaicos gerados;
- Examinar o potencial dos modelos 3D e ortomosaicos na representação da superfície dos pavimentos, considerando sua precisão e praticidade para identificação de defeitos;
- Correlacionar as informações extraídas dos produtos fotogramétricos com

- os dados encontrados em campo para análise da condição do pavimento;
- Validar o uso de *smartphone* como alternativa viável na adaptação do procedimento de aquisição de imagens do pavimento e avaliação de defeitos (PAIPA);
 - Classificar a condição do pavimento com base em índices e indicar as atividades de intervenção a partir da análise dos ortomosaicos.

1.2 JUSTIFICATIVA

A gestão eficiente das vias urbanas é primordial para garantir a segurança e a mobilidade das pessoas, além de impactar diretamente o desenvolvimento econômico e social das cidades. No entanto, a avaliação e o monitoramento da condição dos pavimentos urbanos ainda enfrentam desafios significativos, principalmente devido à ausência de diretrizes normativas específicas e de métodos sistemáticos adotados pelos municípios.

Atualmente, grande parte das normativas voltadas para a avaliação de pavimentos foi desenvolvida com foco em rodovias interurbanas e vias rurais, desconsiderando as particularidades do ambiente urbano. Essas normas baseiam-se em proposições gerais e análises estatísticas clássicas, não contemplando fatores inerentes ao crescimento das cidades e à dinâmica do tráfego urbano, os quais influenciam diretamente a conservação da superfície das vias (Lázaro *et al.*, 2022). Diante desse cenário, torna-se essencial o desenvolvimento de novas abordagens metodológicas ou a adaptação das técnicas convencionais, permitindo uma avaliação mais abrangente e condizente com a realidade das vias urbanas.

Além disso, o tráfego intenso e a falta de metodologias específicas para a avaliação desses pavimentos tornam a gestão da infraestrutura ainda mais desafiadora. Nesse contexto, a implementação de métodos de avaliação confiáveis, acessíveis e economicamente viáveis é fundamental para otimizar as atividades de manutenção e reabilitação (M&R), garantindo maior eficiência na alocação de recursos.

A literatura científica também reflete essa lacuna, uma vez que há poucas publicações voltadas à aplicação de tecnologias emergentes para o levantamento de defeitos em pavimentos urbanos. Em especial, a eficácia e a

aplicabilidade de novas abordagens, como a fotogrametria com *smartphones* para pavimentos urbanos, ainda são pouco exploradas.

Assim, a proposta da pesquisa visa preencher essa lacuna, analisando a viabilidade do uso da fotogrametria para a avaliação de pavimentos urbanos. Ao investigar o potencial dessa tecnologia, busca-se contribuir para a gestão eficiente da infraestrutura viária urbana, promovendo a preservação dos pavimentos e o uso eficiente dos recursos disponíveis.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho encontra-se dividido em 8 capítulos distribuídos da seguinte forma:

Capítulo 1: Seção introdutória onde são apresentados o contexto, os objetivos e a justificativa do estudo.

Capítulo 2: Discute a definição, objetivos e atividades do SGP, abordando a importância da avaliação dos pavimentos, tipos de avaliação, suas vantagens, limitações e as normas pertinentes, além dos principais índices utilizados.

Capítulo 3: Explora o conceito e as aplicações da fotogrametria, com foco na fotogrametria à curta distância, e apresenta novas tecnologias para a inspeção e modelagem de pavimentos.

Capítulo 4: Descreve os procedimentos experimentais adotados na pesquisa, incluindo a coleta de dados, configuração dos equipamentos e as metodologias de análise para gerar modelos e representações espaciais para a avaliação dos pavimentos.

Capítulo 5: Dedicado à apresentação dos resultados obtidos nas etapas executadas no desenvolvimento da pesquisa.

Capítulo 6: Retrata as conclusões obtidas nesta pesquisa.

2 SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS

2.1 VISÃO GERAL

Um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) integra atividades de planejamento, construção, manutenção, avaliação e pesquisa, por meio de um banco de dados que busca otimizar a utilização dos recursos, facilitando o desenvolvimento de programas de manutenção eficazes (Haas, Hudson e Zaniewski, 1994). O objetivo central desse sistema é assegurar o melhor retorno possível para os recursos investidos, garantindo pavimentos seguros, confortáveis e econômicos aos usuários (Fernandes Júnior, 2001).

Nesse sentido, no contexto do SGP, os elementos centrais incluem dados de inventário, avaliações da condição dos pavimentos, estabelecimento de critérios, modelos de previsão de desempenho, estratégias de manutenção e reabilitação, priorização de segmentos e avaliação econômica de estratégias alternativas (Farashah; Tighe, 2014). Um banco de dados estruturado é essencial para consolidar e atualizar as informações, permitindo análises fundamentadas em dados e evitando a repetição de erros do passado.

Em termos operacionais, o SGP opera em dois níveis: rede e projeto. Ao nível de rede, prioriza-se a quantidade sobre a qualidade das informações coletadas, permitindo uma visão geral da malha viária. Já no nível de projeto, o foco está voltado para o “o quê, como, onde e quando” fazer a manutenção (DNIT, 2011). Esses dois níveis de operação garantem que a gestão da infraestrutura viária seja eficiente e capaz de responder tanto a uma visão global quanto a necessidades específicas.

No entanto, as vias urbanas apresentam desafios particulares em comparação com as rodovias, como o alto volume de pedestres e ciclistas, deslocamentos curtos e frequentemente conturbados, e um grande número de interseções, semáforos e rótulas, que reduzem a velocidade do fluxo de veículos (Lima Neto, 2019). Essas características exigem adaptações nas metodologias de monitoramento e avaliação da condição dos pavimentos, além de estratégias específicas para manutenção e reabilitação.

Assim, no contexto urbano, os Sistemas de Gerência de Pavimentos Urbanos (SGPU) adaptam os princípios gerais dos SGPs às especificidades das

idades, enfrentando desafios adicionais, como interferências de sistemas de infraestrutura urbana (redes de água, esgoto, eletricidade, gás e telefonia), o que torna o gerenciamento mais complexo. Além disso, a segregação do tráfego, com faixas exclusivas para ônibus, exige adaptações no planejamento (Danieleski, 2004).

Há ainda impactos causados por árvores nas bordas dos pavimentos, cujas raízes interferem diretamente na estrutura dos pavimentos, e a drenagem deficiente, que contribui para o acúmulo de água e acelera o processo de deterioração. Outro ponto relevante é a necessidade de sinalização horizontal, frequentemente dependente de adaptações no pavimento, que reforça a importância de processos gerenciais bem estruturados (Danieleski, 2004).

Esses desafios ressaltam a importância de processos gerenciais eficazes, baseados na documentação e atualização de dados de inventário, na avaliação periódica da condição dos pavimentos e no uso de critérios formais para seleção de estratégias de manutenção e reabilitação (Oliveira *et al.*, 2012). A implementação de um SGPU eficiente requer, além de tecnologias adequadas, integração entre departamentos e treinamento contínuo dos profissionais envolvidos, como também métodos simples e práticos para coleta de dados (Páez, 2015).

Entretanto, apesar das vantagens, a implantação de SGPUs no Brasil ainda enfrenta limitações significativas, especialmente em municípios menores, onde a manutenção é frequentemente realizada sem planejamento adequado. Intervenções baseadas em apelos populares ou interesses políticos, ao invés de critérios técnicos, são comuns, refletindo a ausência de sistemas estruturados e de trabalhos integrados entre as áreas responsáveis (Zanchetta, 2017; Lima; Ramos; Fernandes Júnior, 2006).

Esse contexto revela a necessidade de uma gestão sustentável da manutenção de pavimentos urbanos, uma vez que as vias públicas desempenham papel fundamental no acesso ao trabalho, à educação e a serviços essenciais (Balbo, 1997). Uma gestão eficiente e estruturada não apenas prolonga a vida útil dos pavimentos, mas também contribui para uma cidade mais bem organizada e administrada.

Portanto, a implementação de um SGPU se torna crucial para preservar e otimizar os recursos públicos, garantindo a qualidade das vias urbanas. Para

isso, é fundamental adotar métodos técnicos e dados estruturados, assegurando uma gestão eficaz, baseada em critérios técnicos e um planejamento adequado, o que permite o uso eficiente dos recursos de manutenção e o prolongamento da vida útil dos pavimentos.

Dessa forma, o SGPU não apenas contribui para a conservação das infraestruturas viárias, mas também aprimora os processos decisórios, tornando as intervenções mais precisas e planejadas, minimizando custos e maximizando os benefícios à sociedade. Esse panorama ressalta a importância de uma gestão eficiente e de uma avaliação detalhada da condição dos pavimentos, o que direciona para a discussão das metodologias de avaliação.

2.2 AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PAVIMENTOS

A condição da superfície dos pavimentos é um indicador essencial para avaliar o conforto, segurança e economia dos usuários na malha viária. Sua avaliação otimiza o uso dos recursos públicos e preserva infraestrutura, pois pavimentos em bom estado exigem menos manutenção. Além disso, essa avaliação contribui para determinar a condição funcional, estrutural e operacional da rede, servindo como base para a alocação periódica do SGP (DNIT, 2011).

Para o SGP, a avaliação da condição de pavimentos é uma das suas principais atividades, pois possibilita verificar o real estado do pavimento, determinar os tipos de intervenções necessárias, estabelecer a qualidade das manutenções realizadas e verificar se o pavimento está exercendo o objetivo para o qual foi construído (Hass; Hudson, 1978).

Essa análise tem como funções principais a identificação dos segmentos prioritários, a análise do desempenho dos pavimentos, a avaliação da eficácia das atividades de manutenção, a detecção de mudanças na condição do pavimento entre avaliações, e a delimitação de trechos homogêneos para o projeto e seleção de alternativas de manutenção (Matos, 2004).

A eficiência do pavimento reflete diretamente na redução dos investimentos em manutenção, garantindo ao mesmo tempo um nível adequado de conforto e segurança para os usuários. Portanto, quanto mais eficiente o pavimento, menor o investimento em manutenção, o que resulta em economia de recursos a longo prazo (Souza, 2009).

Para isso, é importante realizar uma avaliação criteriosa da superfície dos pavimentos, por meio de procedimentos padronizados de medidas e observações, possibilitando inferir suas condições funcionais e estruturais. A avaliação funcional visa avaliar em que medida o pavimento atende aos requisitos de conforto e segurança do usuário, enquanto a avaliação estrutural busca avaliar a capacidade de um conjunto estrutural para atender às demandas climáticas e de tráfego (Prestes, 2001).

A fim de garantir a confiabilidade e a segurança da avaliação, os procedimentos adotados para o levantamento da condição do pavimento devem ser eficientes tanto na coleta quanto no processamento de dados (Chamorro *et al.*, 2009). As técnicas de avaliação podem ser manuais, automáticas ou semiautomáticas, cada uma com suas vantagens e limitações (Farashah, 2012).

No modo de avaliação manual, os avaliadores percorrem a via e coletam as informações necessárias para apontar a condição do pavimento. Esse processo permite uma análise detalhada e precisa dos defeitos, embora requeira maior tempo e recursos humanos, o que pode aumentar os custos e a complexidade da operação (Osorio, 2015).

Por outro lado, as técnicas automáticas e semiautomáticas, que utilizam tecnologias baseadas em imagens digitais e *softwares* especializados, têm se mostrado mais confiáveis, eficazes e seguros do que os métodos manuais. No entanto, devido às limitações com a tecnologia atual, alguns defeitos ainda são difíceis de serem detectados, sendo uma boa alternativa a associação das avaliações manual e automática para uma avaliação mais completa (Chamorro *et al.*, 2009; Osorio, 2015).

Portanto, uma avaliação precisa não só fornece informações detalhadas sobre a condição atual do pavimento, mas também orienta o planejamento das manutenções, contribuindo para a tomada de decisões baseadas em dados estruturados e evidências. O tipo de avaliação e a técnica utilizada dependem dos objetivos específicos da análise. Dentre os diferentes métodos existentes, esta pesquisa abordará apenas a avaliação subjetiva e objetiva, considerando seu foco na determinação da condição da superfície de pavimentos flexíveis.

2.2.1 Avaliação Subjetiva

Os primeiros estudos sobre essa avaliação surgiram nos Estados Unidos por volta de 1950. Nesses estudos, a *American Association of State Highway Officials* (AASHO), atual *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), desenvolveu o *Present Serviceability Rating* (PSR), índice que mede o nível de serventia do pavimento com base na percepção do usuário em algum momento da vida útil do pavimento. O PSR reflete a serventia do pavimento conforme o entendimento de um grupo de avaliadores.

No Brasil, o PSR corresponde ao Valor de Serventia Atual (VSA), normatizado pelo DNIT (2003b). O VSA é uma medida subjetiva da condição da superfície, realizada por um grupo de avaliadores que percorrem um determinado trecho e registram suas opiniões sobre a capacidade do pavimento em atender às exigências do tráfego. O VSA varia de 0 (péssima serventia) a 5 (ótima serventia).

Para realizar a avaliação, estabelecem-se algumas condições específicas. Os trechos avaliados devem possuir extensão máxima de 2000 metros e a avaliação deve ocorrer sob condições climáticas favoráveis. Além disso, ao aferir, os avaliadores devem considerar apenas o estado atual da superfície do pavimento, ignorar os aspectos geométricos e a resistência à derrapagem, desconsiderar os desconfortos ocasionados por linhas férreas, acesso a pontes e bueiros e avaliar os trechos de forma independente (DNIT, 2003b).

Dada a limitação orçamentária para a manutenção das vias pavimentadas, as avaliações subjetivas são consideradas como uma boa alternativa para levantamentos iniciais da condição dos pavimentos (Pereira, 2019). Um estudo foi realizado nas vias da cidade de Noida, na Índia, onde um painel de avaliadores classificou a condição dos pavimentos com base no conforto ao rolamento, demonstrando que as avaliações subjetivas podem contribuir para o desenvolvimento de modelos de desempenho de pavimentos (Shan *et al.*, 2013a).

Além disso, no trabalho de Pescador, Silva Júnior e Fontenele (2018), diferentes métodos de avaliação foram relacionados, e os autores concluíram

que a avaliação subjetiva é uma ferramenta útil para gestores de pavimentos, já que ela forneceu resultados semelhantes aos de métodos mais complexos.

No entanto, apesar da utilidade das avaliações subjetivas, sua natureza apresenta limitações significativas devido à influência de fatores como as instruções do líder da avaliação, as condições climáticas e a percepção individual dos avaliadores. Avaliadores acostumados a pavimentos em condições precárias podem classificar um pavimento mediano como excelente, enquanto outros, habituados a condições superiores, podem avaliá-lo como péssimo. Essas variações podem afetar a consistência e a precisão dos resultados.

Para mitigar essas discrepâncias, diversos estudos têm voltado seu objetivo para o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem os avaliadores durante as avaliações subjetivas, como escalas visuais, que são compostas por uma série de imagens de pavimentos com os mais variados cenários e respectivas notas. Essas escalas auxiliam os avaliadores, proporcionando uma referência para reduzir a dispersão entre as notas.

Nesse sentido, o conceito de escalas visuais começou em Nova York, com o trabalho de Hartgen *et al.* (1982), que classificaram 50 fotografias de vias urbanas. No Brasil, uma escala visual foi desenvolvida a partir de 10 fotografias de vias em cidades do Paraná, avaliadas por especialistas de infraestrutura de transportes (Oliveira *et al.*, 2013).

2.2.2 Avaliação Objetiva

A avaliação objetiva da superfície dos pavimentos flexíveis busca identificar e classificar os defeitos encontrados na superfície do pavimento, atribuindo-lhes qualitativamente. O reconhecimento dos defeitos e de suas causas possui extrema importância para um SGP, pois, a partir dessas informações, serão definidas as atividades de manutenção e reabilitação (M&R) e o momento certo de intervenção (Bertollo, 1997).

Os defeitos podem aparecer já no início da operação da via, devido a falhas no projeto ou execução, e durante sua vida em serviço (Soncim, 2011). A avaliação pode ser realizada por meio de caminhada sobre o pavimento ou dentro de um veículo em movimento. Embora o método de caminhada resulte na coleta de dados mais precisos, exige mais tempo para que toda a malha viária

seja avaliada. Em relação ao levantamento com uso de um veículo, é possível cobrir a totalidade ou a maior parte da rede, embora os dados não sejam tão confiáveis quanto os coletados por meio de caminhada (Fontenele, 2001; Soncim, 2011).

Para realizar o levantamento de defeitos na superfície dos pavimentos, seguem três passos principais: i) identificação do tipo de defeito, verificando sua presença ou ausência; ii) aferição da extensão dos defeitos, registrada em unidades de área, comprimento ou quantidade; e iii) registro da severidade do defeito, indicando seu estágio de deterioração, geralmente classificado como "Alta", "Média" ou "Baixa" (Salviatto 2021).

Ao longo do tempo, um dos principais desafios da avaliação objetiva tem sido o desenvolvimento de técnicas simples e rápidas, que possam ser aplicadas por qualquer pessoa com um mínimo de capacitação (Páez, 2015). Sendo assim, é essencial que o levantamento da condição da superfície dos pavimentos seja conduzido de forma a analisar tanto os defeitos quanto suas possíveis causas, atribuindo indicadores numéricos que classifiquem o estado geral do pavimento.

A avaliação da condição dos pavimentos, seja por métodos subjetivos ou objetivos, desempenha um papel crucial na gestão eficiente das infraestruturas viárias, permitindo identificar deficiências, prever necessidades de manutenção e garantir a segurança dos usuários. Embora as avaliações subjetivas ofereçam uma abordagem prática e rápida, sua precisão pode ser influenciada por variáveis externas, enquanto as avaliações objetivas, apesar de mais detalhadas, exigem maior tempo e recursos.

Assim, ambas as abordagens são complementares e contribuem para um diagnóstico mais completo da condição do pavimento. Para sistematizar essa avaliação e tornar a gestão mais eficiente, os índices de condição do pavimento se apresentam como ferramentas essenciais para quantificar e monitorar o estado dessas superfícies, proporcionando uma forma estruturada e objetiva de avaliar e priorizar as ações de manutenção.

2.3 ÍNDICES DE CONDIÇÃO DE PAVIMENTO

Os índices de condição são fundamentais na avaliação de pavimentos, pois sintetizam informações sobre uma série de critérios em uma visão geral da

condição das vias. No contexto dos SGP, esses índices podem auxiliar a identificar as atividades de intervenção mais adequadas e a priorizar os trechos que necessitam de manutenção. Em muitos SGPUs, esses índices são a única ferramenta utilizada para determinar as ações corretivas, agrupando tanto os dados obtidos em avaliações subjetivas quanto em avaliações objetivas (Albuquerque, 2017).

Apesar de não existirem métodos definitivos ou experimentais para o cálculo de um índice de condição, muitos indicadores têm sido propostos e utilizados ao longo do tempo (Chen *et al.*, 1993; Khedr; El Dimeery, 1994; Bertollo, 1997).

Durante as avaliações objetivas, diversos tipos de defeitos são identificados, cada um com níveis variados de severidade e extensão. Para evitar interpretações equivocadas sobre o estado do pavimento, essas informações devem ser organizadas e agrupadas em formatos de índices que traduzam o estado do pavimento em valores dentro de uma escala pré-definida (Soncim, 2011).

Em seguida, serão discutidos exemplos de índices combinados de defeitos, além de propostas para a simplificação e integração desses critérios, visando uma análise mais abrangente da condição dos pavimentos.

2.3.1 *Pavement Condition Index* – PCI

O *Pavement Condition Index* (PCI) foi desenvolvido pelo *United States Army Corps of Engineer* – USACE (Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos) em 1976 para classificar a condição de pavimentos de aeródromos, sendo posteriormente expandido para a avaliação de estradas, ruas e estacionamentos constituídos por pavimentos flexíveis e rígidos (Shahin e Kohn, 1979).

As diretrizes para execução do PCI foram descritas inicialmente por Shahin e Kohn (1979) e publicadas posteriormente na *Headquarters, Department of the Army* (1982). No ano de 1999, a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) padronizou o método e a publicou na norma D6433-99 *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys* (ASTM, 1999). Desde então, várias versões do método foram

divulgadas, sendo a mais recente apresentada na ASTM (2024), incluindo melhorias contínuas.

A avaliação da condição do pavimento é realizada por meio da divisão das vias de tráfego em trechos ou seções, devido à grande extensão, com o objetivo de obter segmentos relativamente homogêneos, uma vez que as vias não apresentam as mesmas características em toda a sua área. Essas seções são subdivididas em unidades amostrais (UAs), que devem ter aproximadamente 135 m² e 315 m², ou seja, 225 ± 90 m². A partir dessa divisão, a avaliação pode ser realizada em todo o trecho do pavimento ou por amostragem.

O PCI é determinado por meio das combinações de três fatores: tipo, severidade e extensão dos defeitos presentes em cada UA. Esses dados são coletados por avaliadores que, ao caminhar sobre as unidades, medem a extensão dos defeitos, classificam suas severidades e registram as informações em um formulário específico.

Ao longo dos anos, a lista de defeitos identificados no método PCI foi expandida e detalhada. A versão de 2009 (ASTM, 2009) separou o defeito “Desintegração e Intemperismo” em dois defeitos distintos, gerando o defeito nº 19 “Desintegração” e o defeito nº 20 “Intemperismo”, totalizando 20 tipos de defeitos, os quais estão listados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Tipos de defeitos considerados no método do PCI

Tipos de Defeitos	
1. Trincas por fadiga	11. Remendo
2. Exsudação	12. Agregado polido
3. Trincas em bloco	13. Buracos
4. Saliências e deformações	14. Passagem de ferrovia
5. Corrugação	15. Afundamento de trilha de roda
6. Depressão	16. Deformação plástica do revestimento
7. Trincas na borda	17. Trincas parabólicas
8. Trincas por propagação de juntas	18. Empolamento
9. Desnível entre a pista e o acostamento	19. Desintegração
10. Trincas longitudinais e transversais	20. Intemperismo

Fonte: adaptado de ASTM (2024)

Com os dados coletados, são calculados os valores-dedução (VD), que indicam a proporção do impacto de cada defeito na condição do pavimento, considerando sua severidade e densidade. O valor do PCI é obtido por meio da soma dos valores-dedução de cada defeito, seguido de um processo de correção, utilizando gráficos específicos que relacionam a densidade do defeito (razão entre a extensão do defeito e a área da UA) e seu nível de severidade.

Quando um defeito apresenta múltiplas severidades dentro de uma mesma UA, é necessário fazer uma correção do PCI. Com a densidade combinada, o novo VD é calculado, e o procedimento descrito anteriormente para o cálculo do PCI é repetido. Após esse cálculo, deve-se adotar o maior valor encontrado como o valor final do PCI para a UA.

A classificação do pavimento é feita a partir de uma escala que associa a pontuação do PCI à sua condição visual, utilizando uma escala de cores, podendo variar 0 (pior condição) a 100 (melhor condição), conforme ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Classificação da condição do pavimento de acordo com o PCI

Padrão PCI		Cores
100	Excelente	Verde Escuro
85	Muito Bom	Verde Claro
70	Bom	Amarelo
55	Regular	Vermelho Claro
40	Ruim	Vermelho Intermediário
25	Muito Ruim	Vermelho escuro
10	Péssimo	Cinza Escuro
0		

Fonte: adaptado de ASTM (2024)

De acordo com o valor do PCI, diferentes estratégias são recomendadas. Shahin (2005) sugere a manutenção preventiva para pavimentos com PCI superior a 70, a reabilitação para valores entre 41 e 70 pontos, e a reconstrução para pavimentos com PCI igual ou abaixo de 40.

2.3.2 Matriz de Valores Fixos - MVF

O método da Matriz de Valores Fixos (MVF), proposto por Zanchetta (2017), foi desenvolvido com o objetivo de diminuir a subjetividade e aumentar a produtividade na coleta de dados. A proposta foca em cinco defeitos mais comuns encontrados nas vias urbanas de São Carlos/SP: buraco, desgaste, remendo, trinca por fadiga e deformação permanente. Essa simplificação resultou em uma coleta de dados mais ágil e consistente, com redução de custos e menor necessidade de avaliadores.

A extensão de cada defeito é classificada em uma escala de baixo, médio e alto, e a severidade é determinada de acordo com os critérios estabelecidos no manual SHRP (1993). Neste método, para cada tipo de defeito, são estabelecidos valores fixos para todas as combinações de severidade e extensão de cada defeito, conforme a matriz apresentada na Figura 2.2 que ilustra como essas classificações são aplicadas.

Figura 2.2 – Matriz de valores fixos

		SEVERIDADE		
		Baixa	Média	Alta
EXTENSÃO	Baixa	1	5	11
	Média	5	11	15
	Alta	11	15	20

Fonte: Zanchetta (2017)

Para validar a eficácia do método proposto, Zanchetta (2017) comparou os resultados obtidos com o Índice de Condição de Pavimentos (ICP), que considera cinco defeitos, com os resultados obtidos pelo PCI, que abrange um

número maior de defeitos. A análise revelou que o ICP, ao considerar um número menor de defeitos, foi mais preciso para diferenciar a condição dos pavimentos. Esse índice se mostrou mais eficaz para identificar as vias que devem ser priorizadas no recebimento de atividades de M&R.

Além disso, ao considerar um número reduzido de defeitos, o método proposto proporciona uma avaliação mais rápida e eficiente, aumentando o potencial de reprodutibilidade e resultados mais consistentes. Isso torna a abordagem vantajosa para aplicações práticas em avaliações de pavimentos urbanos, pois permite decisões mais rápidas e fundamentadas com base em dados consistentes.

2.3.3 Índice de Condição Atual de Pavimentos - ICAP

O Índice de Condição Atual de Pavimentos foi desenvolvido por Salviatto (2021) com base na metodologia *Measuring Attractiveness by a Category Based Evaluation Technique* (MACBETH). O método foi constituído por cinco fases principais: estruturação (seleção dos critérios e dos níveis de desempenho), avaliação (obtenção dos pesos, das funções de valor Macbeth e modelação do ICAP), teste (aplicação do ICAP em campo), validação (comparação do ICAP com outros índices de condição) e análise de sensibilidade (análise dos resultados após alteração nos pesos dos critérios).

Foram testados quatro cenários de análise: ICAP_{Escala visual + Online}, ICAP_{Info básica + In loco}, ICAP_{Escala visual + In loco}, ICAP_{Info básica + Online}. Os resultados apresentaram correlação quase perfeita entre si, indicando a consistência e flexibilidade do método.

Ao comparar o ICAP com outros índices, observou-se que, embora os valores do ICAP aumentassem ou diminuíssem de uma UA para outra seguindo a mesma tendência dos outros índices como PCI, ICP_{MVF} e avaliações subjetivas, a intensidade dessas variações não foi uniforme. Por fim, Salviatto (2021) concluiu que ICAP é uma ferramenta prática e confiável para a avaliação da condição da superfície de pavimentos flexíveis urbanos.

2.3.4 Índice de Condição de Pavimentos – ICP_{IA}

O Índice de Condição de Pavimentos foi desenvolvido pelo Instituto do Asfalto para avaliar a condição geral da superfície de pavimentos, com base no documento *A Pavement Rating System for Asphalt Pavement*, publicado em 2012, pela *Minnesota Asphalt Pavement Association* (MAPA). O método adota uma maneira eficaz de examinar o pavimento, recomendando que seja realizada uma inspeção a pé, de forma minuciosa, com o avaliador registrando o tipo e a extensão dos defeitos à medida que avança.

Após a inspeção, o formulário de classificação é preenchido e, como o sistema é baseado em julgamento pessoal, melhores resultados são obtidos quando dois ou mais avaliadores realizem a inspeção para obter resultados mais precisos. Defeitos de menor gravidade recebem valores entre 0 e 5, enquanto defeitos mais graves, que afetam diretamente a resistência do pavimento, são avaliados em uma escala de 0 a 10. Uma classificação de 0 significa que o pavimento está livre desse determinado tipo de defeito, enquanto uma classificação com nota máxima significa que o trecho avaliado é muito ruim.

A atribuição das notas leva em consideração tanto a extensão quanto a gravidade de cada defeito. Por exemplo, uma classificação de 10 para afundamento nas trilhas de rodas sugere que a maioria do pavimento está afetada por sulcos profundos, representando um risco de segurança e dificultando o tráfego em todos os momentos. Em contraste, uma classificação de 1 para corrugações indica que as ondulações, embora evidentes, não são numerosas e nem muito grandes.

Após a avaliação de cada defeito individualmente, os valores são somados e subtraídos de 100, resultando na classificação da condição, como exhibe a Figura 2.3.

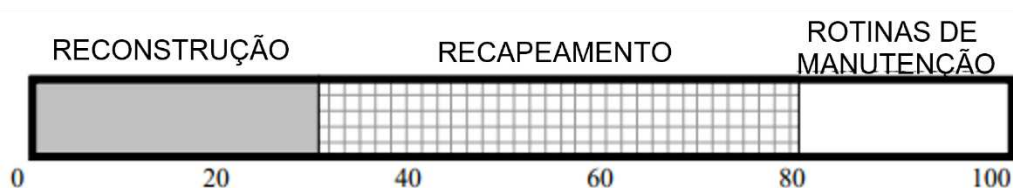
Figura 2.3 – Planilha para avaliação da condição dos pavimentos

FORMULÁRIO DE CLASSIFICAÇÃO DO PAVIMENTO ASFALTO		
Obs: a classificação 0 indica que o defeito não ocorre		
Defeito	Classificação	Pontuação
Trincas Longitudinais	0-5	
Trincas Longitudinais	0-5	
Trinca em Bloco	0-10	
Trinca por Fadiga	0-10	
Trincas por Retração	0-5	
Trilhas de Roda	0-10	
Corrugação	0-5	
Desintegração	0-5	
Deformação Plástica do Revestimento	0-5	
Buracos	0-10	
Exsudação	0-5	
Agregado Polido	0-5	
Deficiência de Drenagem	0-10	
Avaliação Subjetiva	0-10	
Soma dos defeitos =		
Classificação da Condição =		100 - Soma dos defeitos
Classificação da Condição =		

Fonte: adaptado de Minnesota Asphalt Pavement Association (2012)

A classificação da condição fornece um índice geral do tipo e grau de reparo necessário. De acordo com o método, as estratégias são divididas em três tipos: para pavimentos com classificação acima de 80, recomenda-se que atividades rotineiras de manutenção. Pavimentos com notas entre 30 e 80 podem exigir atividade de recapeamento, enquanto aqueles com pontuação abaixo de 30 sugerem a reconstrução do pavimento, como mostra a Figura 2.4.

Figura 2.4 – Avaliação da condição do pavimento como indicador no tipo de manutenção



Fonte: adaptado de Minnesota Asphalt Pavement Association (2012)

No estudo realizado por Gimenes, Silva Júnior e Fontenele (2023), foi analisada a relação entre o ICAP e o ICP_{IA}, revelando que, de maneira geral, ambos os índices apresentaram resultados semelhantes. A análise estatística revelou uma correlação satisfatória entre os índices, evidenciando que há uma relação significativa entre os métodos. Em algumas UAs, o ICP_{IA} apresentou valores superiores ao ICAP, mas ambos se mostraram eficazes e práticos para a avaliação da condição do pavimento, sendo ferramentas confiáveis para a priorização de intervenções.

Os índices de condição de pavimentos, como PCI, MVF, ICAP e ICP_{IA}, desempenham papéis fundamentais na avaliação e priorização de intervenções, fornecendo uma síntese clara e objetiva da condição das vias. Cada método possui características específicas que atendem a diferentes contextos e necessidades, auxiliando em decisões mais fundamentadas e eficazes.

Contudo, apesar dos avanços nesses métodos, o processo ainda depende, em grande parte, de inspeções manuais e subjetivas, destacando a necessidade de integrar tecnologias digitais para a coleta e o processamento de dados. Essas inovações emergem como ferramentas promissoras para otimizar a precisão, a eficiência e a consistência nas avaliações de pavimentos, representando um avanço indispensável nesse campo de estudo.

3 TÉCNICAS DIGITAIS DE COLETA E TRATAMENTO DE DADOS PARA FINS DE SGPU

3.1 FOTOGRAMETRIA

A fotogrametria se consolidou como uma ferramenta essencial para a obtenção de formas e medidas desde o seu surgimento, em meados do século XIX, inicialmente aplicada ao levantamento de monumentos históricos (Groetelaars e Amorim, 2004). Seu nome deriva dos radicais gregos *fotos* (*luz*), *gramma* (desenhado ou escrito) e *metron* (medir), significando a medição gráfica por meio da luz (Tommaselli, 2009).

Com o advento de novos tipos de sensores, a fotogrametria se tornou mais ampla, sendo vista como a arte, ciência e tecnologia de obter informações confiáveis sobre objetos físicos e o meio ambiente por meio de processos de gravação, medição e interpretação de imagens e padrões de energia eletromagnética radiante (Córdoba, 2012; Tommaselli, 2009).

O objetivo principal da fotogrametria é reconstruir um espaço tridimensional a partir de um conjunto de imagens bidimensionais, transformando o sistema fotográfico bidimensional em uma representação tridimensional do espaço ou do objeto documentado. Essa capacidade é crucial para aplicações que demandam precisão elevada, especialmente em estudos detalhados de superfícies ou objetos (Coelho Filho; Silva, 2007; Liu *et al.*, 2020).

A fotogrametria pode ser classificada com base na posição espacial da câmera e nos objetivos de uso, sendo geralmente dividida em terrestre e aérea. A fotogrametria terrestre utiliza as imagens tomadas em locais próximos ou na superfície do terreno, fornecendo informações dimensionais detalhadas de objetos. Por outro lado, a fotogrametria aérea, ou aerofotogrametria, baseia-se em fotografias obtidas por câmeras a bordo de aeronaves, abrangendo vastas áreas de superfície terrestre (Marchetti; Garcia, 1977; Liu; Huang, 2016).

Quando a distância entre a câmera e o objeto for inferior a 100 metros, a fotogrametria é definida como fotogrametria terrestre à curta distância (Liu e Huang, 2016). Baseada no princípio da visão estéreo binocular, essa técnica permite captar imagens do mesmo alvo em diferentes momentos ou posições, possibilitando a análise das restrições geométricas da sequência de imagens. A

partir dessa análise, é possível calcular as coordenadas tridimensionais da superfície do objeto observado, evidenciando a precisão e a relevância da fotogrametria em medições detalhadas (Mena; Torres, 2020).

Essa abordagem tem se mostrado uma alternativa eficaz e econômica, especialmente em áreas como engenharia civil, arquitetura e monitoramento de infraestruturas. Suas principais vantagens incluem a possibilidade de realizar medições sem que a câmera precise estar em contato direto com o objeto, a rápida aquisição de informações, a aplicabilidade em objetos em movimento ou sujeitos a deformações e a facilidade de medir geometrias complexas com alta precisão (Mendonça, 1984).

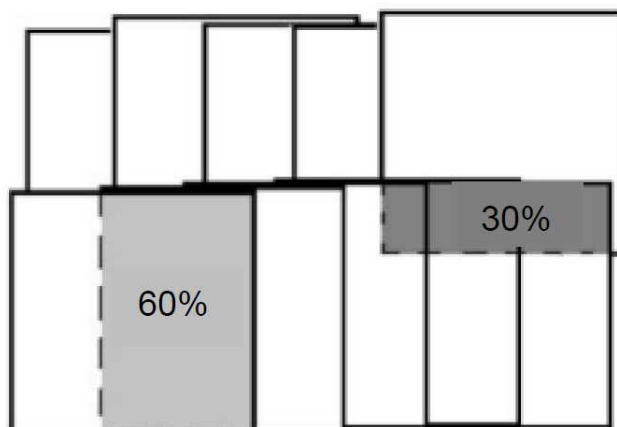
A popularização da fotogrametria digital ampliou ainda mais seu alcance, democratizando o acesso à tecnologia por meio de equipamentos de menor custo e fácil acesso, como computadores, câmeras digitais, scanners e *softwares* intuitivos (Groetelaars; Amorim, 2004). Esse avanço tem permitido a aplicação da técnica em diferentes áreas, tornando-a uma ferramenta viável para análises precisas e detalhadas.

3.1.1 Aquisição de Imagens e o Processo Fotogramétrico

O avanço na capacidade de processamento e análise de dados permitiu a produção de produtos digitais complexos, como ortoimagens e mosaicos, ampliando a aplicação da fotogrametria em setores que exigem alto nível de precisão (Coelho Filho; Silva, 2007). Para uma melhor visualização de áreas amplas, realiza-se a montagem de imagens ou a criação de mosaicos fotogramétricos, gerando a impressão de continuidade entre as fotografias.

A formação dos mosaicos depende da sobreposição de imagens, o que ocorre em um recobrimento aéreo. Mesmo com um número elevado de fotografias, o recobrimento permite maior operacionalidade dessas imagens. Existem dois tipos principais de sobreposição: lateral e longitudinal. A sobreposição lateral (transversal à direção de voo) é de cerca de 30% e ocorre entre as faixas do bloco fotográfico. Já a sobreposição longitudinal (ao longo da faixa de voo) costuma ser superior a 60%, acontece entre as fotografias (Coelho Filho; Silva, 2007; Ferreira, 2014). Conforme ilustrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Sobreposição lateral e longitudinal em voos fotogramétricos



Fonte: Coelho Filho e Silva (2007)

O processo básico para a produção de ortofotos digitais envolve a transformação da projeção central da imagem para uma projeção ortogonal ao plano, o que requer o conhecimento da inclinação, posição e distorção da câmera aérea no momento da captura das fotografias, além das informações do terreno obtidas por meio de um modelo digital (Andrade, 1998).

A obtenção de imagens é essencial, pois viabiliza a documentação, seja na forma de registro fotográfico, seja como sua forma tridimensional reconstruída. A qualidade visual dessas imagens depende de práticas adequadas na configuração da câmera, garantindo que estas sejam relevantes e confiáveis fontes de dados para trabalho (Bagi, 2018; Pospíšil, 2012).

A fotogrametria à curta distância, especificamente, tem mostrado grande versatilidade e pode ser utilizada para a reconstrução tridimensional de superfícies, como pavimentos rodoviários, utilizando câmeras digitais convencionais. Essa técnica, ao permitir a análise das coordenadas tridimensionais de pontos em um objeto a partir de imagens capturadas de diferentes posições, torna-se uma alternativa viável para aqueles que buscam precisão sem a necessidade de equipamentos caros (Kogbara *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2019).

A calibração da câmera é outro aspecto fundamental para garantir a precisão e confiabilidade das medições fotogramétricas à curta distância. A precisão dos dados depende diretamente de como a câmera foi calibrada

(Luhmann; Fraser; Maas, 2016). Além disso, técnicas desenvolvidas para a fotogrametria de objetos capturados à curta distância são essenciais para a modelagem precisa de superfícies com variações sutis de elevação, como as encontradas em pavimentos (Fraser; Cronk, 2009).

Essa abordagem, acessível e eficaz, fortalece a fotogrametria como uma alternativa útil para profissionais que necessitam de alta precisão sem a necessidade de investimento em equipamentos especializados, consolidando sua aplicabilidade em diversas áreas. A seguir, será abordado o impacto das novas tecnologias na avaliação de pavimentos, ampliando ainda mais as possibilidades para análise e monitoramento da condição de pavimentos.

3.2 NOVAS TECNOLOGIAS PARA INSPEÇÃO DE PAVIMENTOS

A constante evolução tecnológica tem gerado uma lacuna científica no desenvolvimento de métodos inovadores para a inspeção de pavimentos, que possam atuar de forma complementar aos métodos já existentes. Diversos pesquisadores têm se dedicado à criação e aprimoramento de novas abordagens para identificar defeitos em pavimentos. Nos últimos anos, métodos automatizados de inspeção de pavimentos foram implementados, utilizando equipamentos com câmeras e tecnologia a laser para melhorar a eficiência e a objetividade dos processos de análise (Romero-Chambi *et al.*, 2020).

Dentre as tecnologias mais promissoras, destaca-se o uso de câmeras ou scanners a laser, que oferecem alta precisão na coleta de dados tridimensionais e têm se mostrado eficazes, mas seu custo elevado ainda é um obstáculo para sua adoção generalizada (Atencio *et al.*, 2022). Como alternativa, o desenvolvimento de câmeras digitais de alta resolução e técnicas de processamento de imagem possibilitou a criação de modelos 3D a partir de imagens capturadas por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs). Essa abordagem revela-se uma solução econômica, mantendo a precisão e a eficiência dos scanners a laser (Romero-Chambi *et al.*, 2020).

O sistema de fotogrametria à curta distância também tem se destacado, permitindo a criação de modelos 3D da textura superficial de pavimentos flexíveis utilizando câmeras portáteis (Mena e Torres, 2020). Nesse contexto, tecnologias mais acessíveis, como câmeras portáteis e *smartphones*, têm mostrado grande

potencial, dispensando esforço físico e garantindo a segurança das equipes em campo (Souza, 2020).

O uso de técnicas de fotogrametria, especialmente aquelas aplicadas no *software ContextCapture*, tem se destacado na reconstrução fotorrealista de modelos 3D a partir de imagens simples. O método de ajuste de feixe ("*bundle adjustment*") no processo de aerotriangulação corrige erros de projeção, minimizando distorções e garantindo a fidelidade dos modelos (Gomes *et al.*, 2020). Esse *software* tem se mostrado eficaz na criação de modelos precisos, facilitando a análise de defeitos na superfície dos pavimentos.

Além da fotogrametria digital, outras tecnologias têm sido exploradas para otimizar a avaliação das condições dos pavimentos. O uso de veículos equipados com câmeras e sensores, por exemplo, tem sido amplamente estudado como uma alternativa para a coleta automatizada de dados. Esses veículos conseguem fornecer imagens detalhadas, geolocalização e informações sobre a textura dos pavimentos, facilitando a análise digital das condições da superfície.

Nesse contexto, estudos como os de Chambo *et al.* (2011) e Schnebele *et al.* (2015) desenvolveram metodologias que utilizam esses veículos para coleta de dados e avaliação das condições dos pavimentos, mostrando que a combinação de câmeras e sensores oferece uma análise mais precisa da superfície, permitindo identificar e mensurar defeitos de forma eficaz.

Os estudos de Branco (2016), Di Renzo (2017) e Parente *et al.* (2017) propuseram o uso de sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs) para o levantamento de defeitos em pavimentos, demonstrando sua eficácia na identificação automática de defeitos como fendas e remendos. Além disso, essas pesquisas destacaram a capacidade dos RPAs em realizar análises detalhadas das características dos defeitos, oferecendo percepções valiosas para sua aplicação na avaliação de pavimentos.

Corroborando esses achados, Lima Neto (2019) analisou o uso de RPAs no levantamento de defeitos em pavimentos urbanos flexíveis e demonstrou que ortofotos geradas por essas aeronaves podem identificar defeitos com alta precisão. Além disso, essas imagens podem ser integradas a sistemas de gerenciamento de pavimentos, otimizando o monitoramento e a tomada de decisões na manutenção viária.

Essa linha de pesquisa é ainda mais enriquecida pelo trabalho de Atencio *et al.* (2022), que propuseram uma metodologia para otimizar os parâmetros de voo de VANTs, utilizando matrizes ortogonais de Taguchi para reduzir o número de experimentos e preservar a significância estatística dos resultados. O método foi testado na reconstrução de modelos 3D de buracos em pavimentos a partir de fotografias de voos de VANTs, demonstrando a eficácia da abordagem na otimização dos parâmetros de voo.

O estudo de Mena e Torres (2020) também contribui para esse cenário, aplicando a técnica de Fotogrametria de Curto Alcance (FCA) em uma microzona de uma estrada de pavimento flexível, estabelecendo uma microrrede de referência e utilizando Modelos Digitais de Elevação (DEM) gerados por algoritmos *Structure from Motion* (SfM). Embora a metodologia ainda esteja em fase inicial, os resultados sugerem que a FCA pode ser uma solução rápida e econômica para estimar o desgaste de pavimentos flexíveis.

Adicionalmente, Gimenes *et al.* (2023) realizaram um estudo comparativo entre RPAs em voos de baixa altitude e o levantamento por caminhamento, destacando a vantagem do primeiro método em termos de qualidade e praticidade. O uso de RPAs também possibilita a criação de bancos de dados fotográficos, contribuindo para o monitoramento contínuo das condições dos pavimentos ao longo de sua vida útil. Neste trabalho, também se concluiu que as medidas aferidas pelo AutoCAD obtiveram notas mais otimistas devido ao processo mais prático durante a mensuração dos defeitos.

Em paralelo a essas abordagens, o uso de *smartphones* tem se mostrado uma solução viável e econômica para a avaliação de rodovias. No Brasil, o uso de dispositivos móveis na inspeção de pavimentos ainda está em estágios iniciais, mas já há estudos promissores que indicam a viabilidade dessa tecnologia.

Gomes *et al.* (2020) analisaram o uso de *smartphones* na criação de modelos fotorrealistas 3D, em que o processamento das imagens foi realizado no *software ContextCapture*. Os resultados demonstram a confiabilidade do processo de reconstrução tridimensional, evidenciando a viabilidade dessa abordagem para documentar pequenos monumentos.

Por fim, a evolução das técnicas digitais ampliou as possibilidades para a inspeção e análise de pavimentos flexíveis urbanos. A fotogrametria,

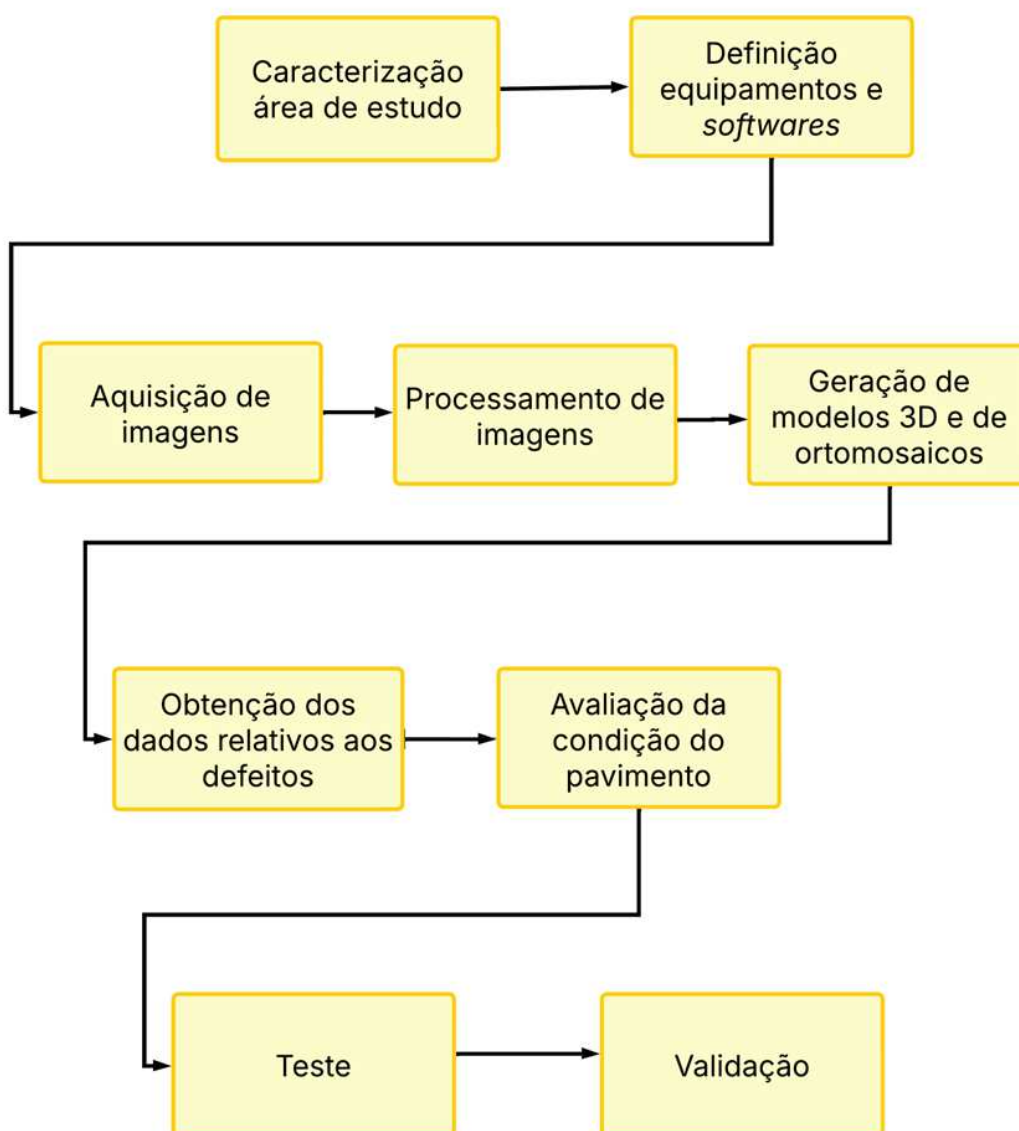
especialmente a de curta distância, se destacou como uma alternativa acessível e eficiente para a reconstrução tridimensional da superfície dos pavimentos, permitindo uma avaliação detalhada sem a necessidade de equipamentos de alto custo.

Neste contexto, o próximo tópico abordará o método de pesquisa adotado neste estudo, detalhando as etapas de coleta, processamento e análise dos dados utilizados para avaliar a condição dos pavimentos.

4 MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo é abordado o método utilizado para o desenvolvimento da pesquisa, foi elaborado um fluxograma para melhor visualização e compreensão, conforme apresentado na Figura 4.1. Este fluxograma resume de forma clara as fases do processo metodológico, oferecendo uma visão geral das etapas interligadas da proposta para avaliação do pavimento.

Figura 4.1 – Fluxograma do método de pesquisa



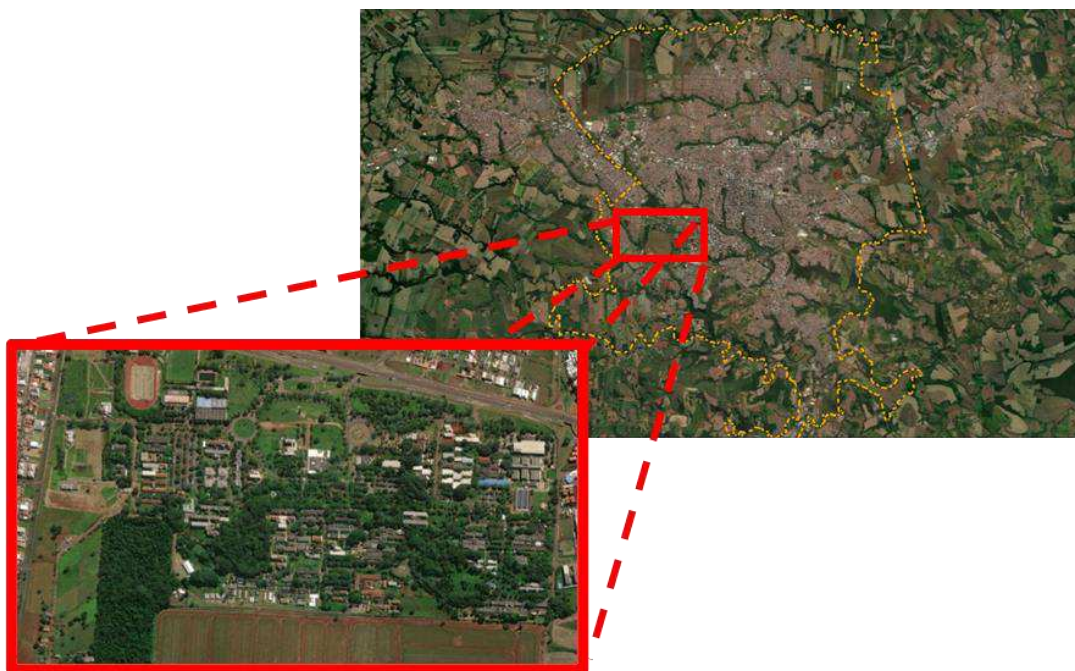
Fonte: o próprio autor

O método de pesquisa foi desenvolvido com adaptações no procedimento de aquisição de imagens do pavimento e avaliação de defeitos (PAIPA), descrito no trabalho de Garcia *et al.* (2024, em desenvolvimento). Enquanto o trabalho original utilizou uma câmera GoPro para a captura de imagens, neste estudo o procedimento foi adaptado para o uso de um *smartphone*, buscando explorar sua praticidade e acessibilidade como ferramenta de aquisição de dados para a avaliação da condição do pavimento.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Como área de estudo, foi escolhido o campus universitário da Universidade Estadual de Londrina (UEL), localizado na região oeste da cidade de Londrina – PR, em uma área urbana, conforme apresentado na Figura 4.2. O campus possui uma extensão territorial de aproximadamente 1,5 km² e conta com uma comunidade de cerca de 25 mil pessoas, entre estudantes, professores e servidores técnico-administrativos, que se deslocam por suas diferentes regiões.

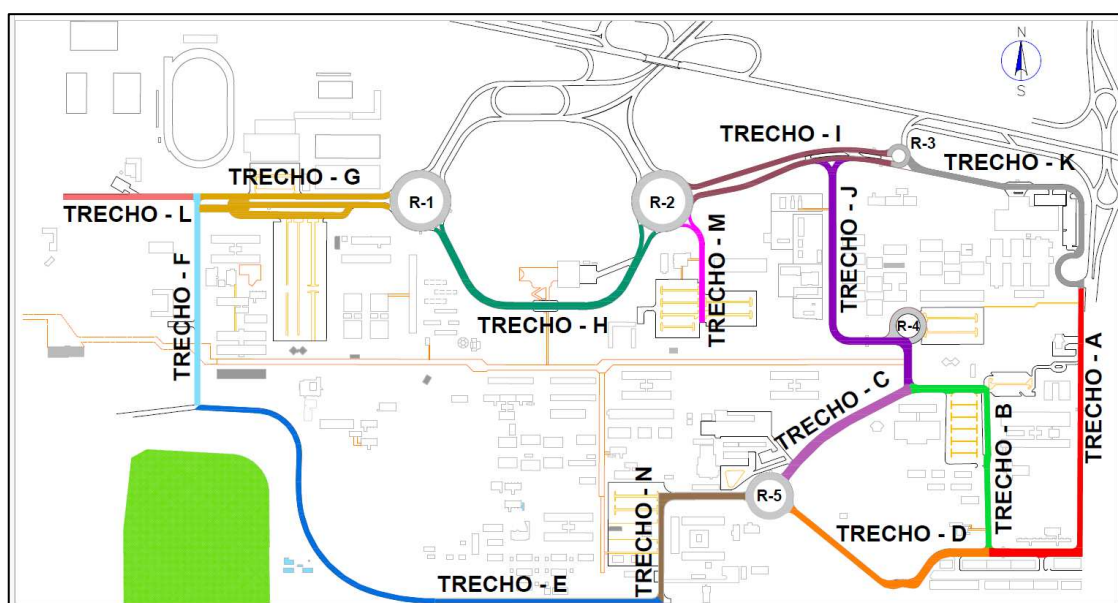
Figura 4.2 – Cidade de Londrina com destaque para o campus UEL



Fonte: ArcGIS Web Map (2025)

A localidade foi escolhida pois o campus registra um fluxo diário diversificado, com pedestres, ciclistas, automóveis e ônibus. Esse intenso movimento de pessoas e veículos reproduz a dinâmica característica de áreas urbanas em cidades de pequeno porte. Inicialmente, a malha viária do campus foi dividida em 19 trechos, de forma a possibilitar uma organização sistemática da análise, como ilustrado na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Mapa de divisão do campus em trechos

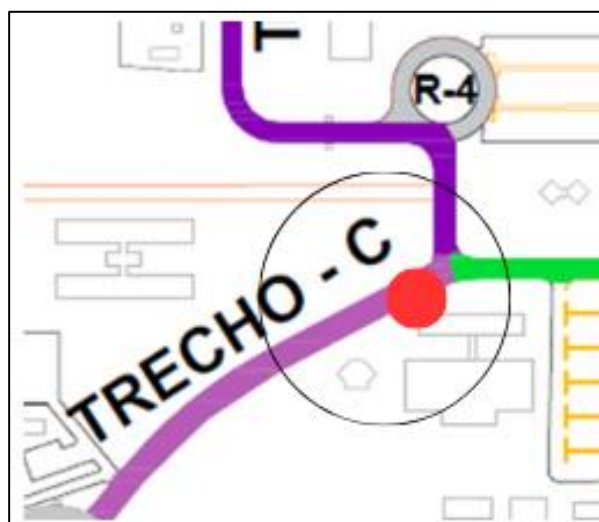


Fonte: Ignacio *et al.* (2018)

Posteriormente, esses trechos foram divididos em seções menores e, por fim, em unidades amostrais (UAs) consecutivas, com área variando entre 135 a 315 m². O dimensionamento seguiu as especificações da norma ASTM (2024), adotando larguras fixas correspondentes às faixas de tráfego e comprimentos variáveis.

Para testar o método de pesquisa proposto, foi escolhida uma unidade piloto: a UA 144, localizada no trecho C. Essa unidade possui largura fixa de 4,1 metros, correspondente à faixa de tráfego, e comprimento de 71,9 metros. A seleção dessa unidade permitiu a execução de testes preliminares e ajustes metodológicos necessários antes da aplicação em maior escala. A localização da unidade piloto está destacada na Figura 4.4.

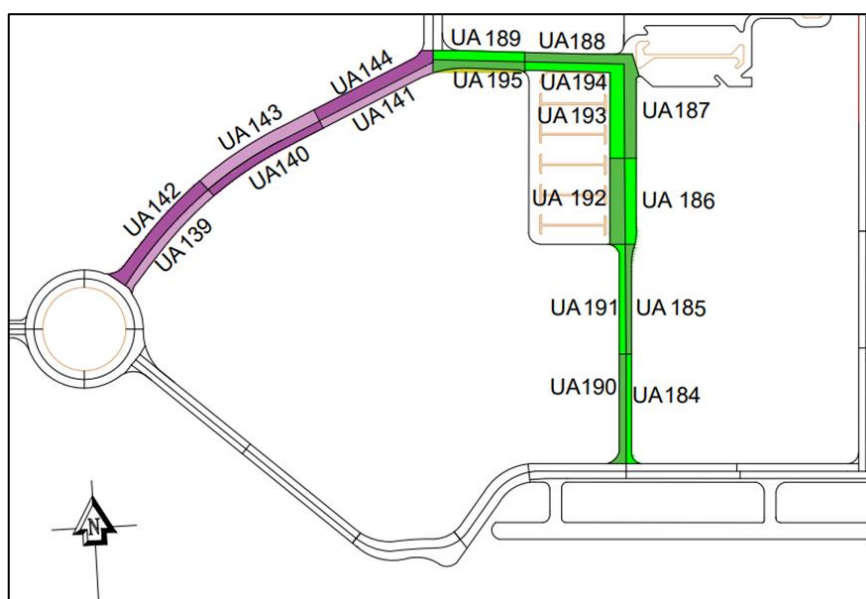
Figura 4.4 – Localização da unidade piloto



Fonte: o próprio autor

Após o teste, o método foi expandido para 17 outras UAs, localizadas nos Trechos B (UA 184 à UA 195) e C (UA 139 à UA 144) do campus, conforme especificado nas Figuras 4.5. É importante destacar que áreas de estacionamento foram excluídas do estudo, concentrando-se exclusivamente na malha viária destinada ao tráfego. Com isso, a área total avaliada foi de aproximadamente 4.800 m².

Figura 4.5 – Localização da área de estudo



Fonte: o próprio autor

Essas unidades estão localizadas em uma área arborizada, como identificado na Figura 4.6, que apresenta a vista aérea do campus universitário. Observa-se a distribuição de diversas construções pelo espaço, além de vias internas, áreas gramadas e estacionamentos. Nota-se, ainda, uma presença significativa de árvores, a ponto de, em algumas partes, a cobertura vegetal ocultar completamente a via na visão aérea.

Figura 4.6 – Visão aérea das vias selecionadas para estudo



Fonte: *Google Earth*, (2025)

As vias internas dessas unidades, como mostra a imagem da Figura 4.7, apresentam forte presença de arborização ao longo das ruas. Observam-se vias asfaltadas ladeadas por árvores, além de postes de iluminação e fiação elétrica visíveis, e os estacionamentos estão distribuídos ao longo das vias. As árvores formam uma cobertura verde que acompanha todo o trajeto, contribuindo para um ambiente mais sombreado.

Figura 4.7 – Visão interna das vias selecionadas para estudo



Fonte: *Google Earth*, 2025

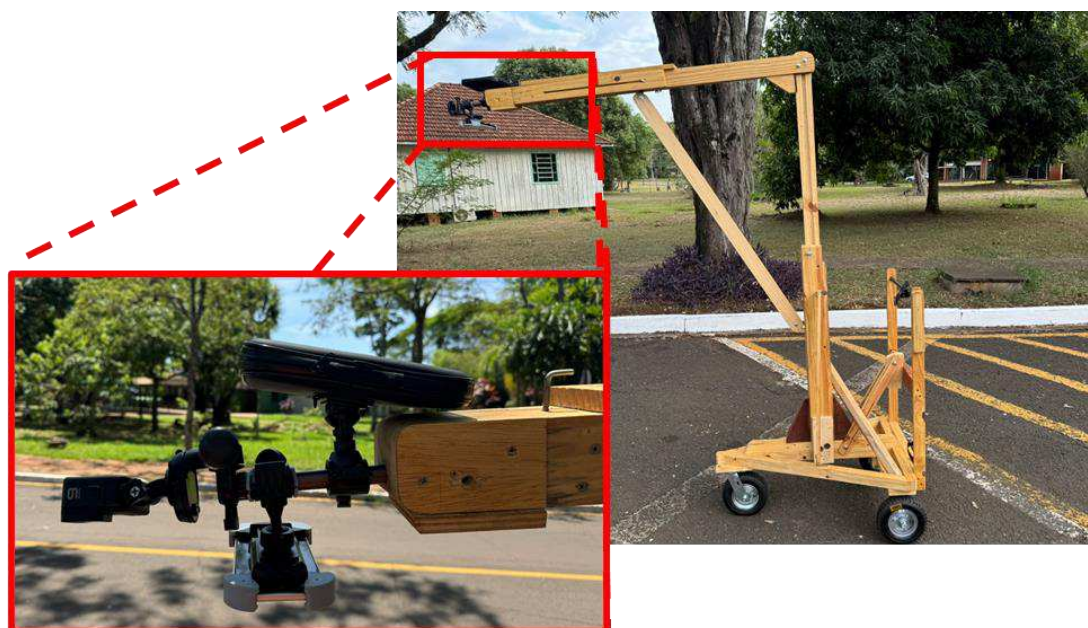
Essa abordagem metodológica assegura a representatividade ao abranger diferentes condições do pavimento dentro do campus, considerando variações de tráfego, exposição ambiental e estado de conservação. Além disso, ao selecionar um espaço dinâmico e urbano como o campus da UEL, o estudo reflete as condições reais enfrentadas por pavimentos flexíveis em áreas urbanas, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de monitoramento e manutenção.

4.2 DEFINIÇÃO DE EQUIPAMENTOS E *SOFTWARES*

Para a coleta de dados em campo, foram utilizados uma combinação de materiais e equipamentos que garantissem a precisão na aquisição dos dados. Os principais materiais foram: protótipo de veículo para o procedimento de aquisição de imagens do pavimento e avaliação de defeitos (VPAIPA), *smartphone*, trena e controle disparador *bluetooth*.

O *smartphone* foi acoplado na altura máxima do VPAIPA, sendo posicionado a aproximadamente 2 metros acima do pavimento, conforme ilustrado na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Protótipo VPAIPA com o *smartphone* acoplado



Fonte: o próprio autor

A aquisição de imagens foi realizada com um *smartphone* da marca *Apple*, modelo *iPhone 11*, equipado com uma câmera dupla que combina lentes grande e ultra angular. Esse dispositivo foi escolhido devido às especificações técnicas avançadas de sua câmera, conforme características apresentadas na Tabela 4.1. Essas características proporcionam uma qualidade superior nas imagens, essencial para o processamento fotogramétrico.

Tabela 4.1 – Especificações da câmera do *smartphone* Iphone 11

Características	Especificação
Resolução	12 megapixels (4032x3024) pixels
Resolução de gravação	4K, 1080p, 720p
Abertura focal	f/1.8 + f/2.4
Distância focal	4 mm
Tamanho pixel	1.4 μ m pixel
Tamanho do sensor	1/2.55"
Distância focal de 35 mm	26 mm
Formatos de arquivo de câmera	HEIF, JPEG, DNG

Fonte: *Dp Preview* (2024)

Para o processamento das imagens e a geração do modelo 3D e dos ortomosaicos, optou-se pela utilização dos *softwares* da linha de produtos *iTwin*, desenvolvida pela *Bentley Systems*, escolhido por suas funcionalidades abrangentes, que facilitam a integração com modelos digitais e permitem a criação de representações precisas de ambientes reais. Esses *softwares* foram acessados por meio de licenças acadêmicas, disponibilizadas pelo programa *Bentley Education*.

O *iTwin Capture Modeler* (versão 24.01.04.380) foi empregado como ferramenta principal para gerar os produtos fotogramétricos, sendo uma evolução do programa *ContextCapture*. Para a visualização dos modelos 3D gerados, utilizou-se o *iTwin Capture Desktop Viewer* (versão 24.1.1.100), enquanto a obtenção de dados do modelo tridimensional foi feita por meio do *iTwin Capture Manage and Extract* (versão 24.2).

Adicionalmente, para converter a extensão das imagens, foi necessário o uso do *software GIMP (GNU Image Manipulation Program)*, este que é um programa gratuito e de código aberto para edição de imagens. O *software AutoCAD* (versão R25.0.116.0.0), versão acadêmica, desenvolvido pela *Autodesk*, também foi empregado para criar projetos detalhados e medir os defeitos nos pavimentos, devido à sua precisão e ampla aplicabilidade.

No que diz respeito à análise estatística dos dados, foi utilizado o *software Jamovi* (versão 2.6.23). Esse programa, por ser uma plataforma de código aberto e gratuita, oferece uma interface funcional e simplificada para a otimização de dados estatísticos, além de um conjunto abrangente de ferramentas que facilitam a interpretação dos resultados.

Para realizar todos esses processos mencionados, foram utilizados três computadores principais: um notebook Dell Inspiron 5567, equipado com processador Intel Core i7-7500U; um computador de mesa HP Compaq Pro 4300, com processador Intel Core i3-3240; e um notebook Acer Nitro, com processador AMD Ryzen. Todos os equipamentos possuíam 8 GB de memória RAM e sistema operacional de 64 bits, garantindo desempenho adequado para as tarefas de processamento de imagens, modelagem e análise de dados.

4.3 AQUISIÇÃO DE IMAGENS

A aquisição de imagens foi planejada de forma a garantir a captura de dados visuais precisos e consistentes do pavimento em estudo. Inicialmente, foram definidos os parâmetros para a delimitação da via, os quais foram seguidos por adaptações no procedimento do PAIPA.

O levantamento foi realizado utilizando um *smartphone* equipado com uma câmera de alta resolução, com fotos e vídeos sendo capturados ao longo da via para permitir uma análise detalhada da condição do pavimento. Para garantir uma cobertura adequada da área estudada, foi definido um critério de sobreposição longitudinal e transversal entre as imagens. Para o cálculo da distância entre os instantâneos, utilizou-se a fórmula:

$$\text{Distância entre instantâneos } (l,t) = \left(1 - \frac{T}{100}\right) * \text{tamanho real } (l,t) \quad (1)$$

Em que, l é a distância longitudinal, t é a distância transversal e T é a sobreposição desejada.

Para determinar o tamanho real do campo de visão da câmera, o VPAIPA com o *smartphone* acoplado foi montado, e uma foto foi capturada em modo paisagem de uma superfície plana com uma fita métrica estendida, conforme ilustrado na Figura 4.9. A análise dessas fotografias revelou que o campo de visão horizontal da câmera é de aproximadamente 2,32 m, enquanto o campo de visão vertical é cerca de 1,75 m.

Figura 4.9 – Campo de visão horizontal e vertical



Fonte: o próprio autor

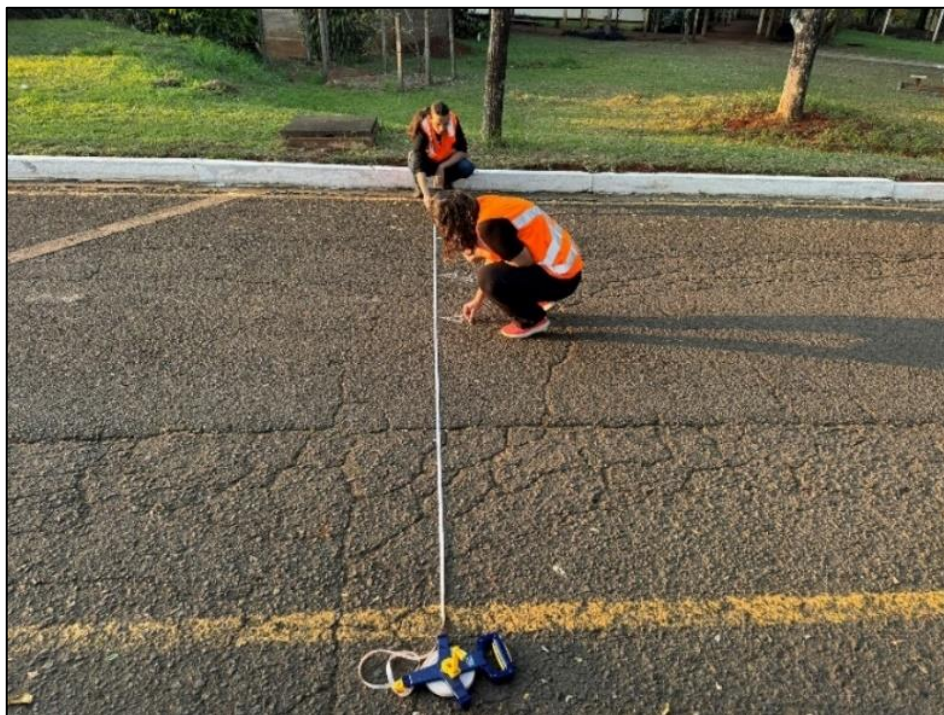
Com base nas recomendações da literatura, de que a sobreposição transversal deve ser maior que 30% e a longitudinal maior que 60% para voos fotogramétricos, a metodologia foi adaptada para garantir que as sobreposições não fossem inferiores a 60% em ambas as direções.

A Fórmula (1) foi aplicada para calcular as distâncias entre instantâneos e, para garantir a sobreposição transversal de 70%, a distância lateral entre os instantâneos foi de 70 cm, calculada a partir do campo de visão horizontal (0,3 x 2,32 m). Da mesma forma, para alcançar uma sobreposição longitudinal de 80%, a distância longitudinal entre os instantâneos foi de 30 cm, calculada como 0,2 x 1,75 m.

Para o levantamento por vídeo, também foi necessário calcular a distância entre os instantâneos com base na mesma técnica de verificação do campo de visão. A análise revelou que o campo de visão horizontal da câmera, neste caso, foi de aproximadamente 2,11 m, e, para manter a distância lateral de 70 cm entre os instantâneos, obteve-se uma sobreposição de aproximadamente 67%, calculada como $1 - (0,7 / 2,11) \times 100$, um valor considerado satisfatório para a cobertura da área de estudo. Em relação à direção longitudinal, não foi necessária uma medição específica, uma vez que os vídeos foram filmados continuamente, sem interrupções, ao longo da linha de passagem.

Portanto, na unidade piloto, foram adotadas as distâncias de 70 cm na direção transversal tanto para fotos quanto para vídeos, e 30 cm na direção longitudinal para as fotos. Para as demais unidades, foi mantida a distância de 70 cm lateralmente. Com esses parâmetros definidos, o próximo passo envolveu o procedimento de levantamento para aquisição de imagens propriamente dito.

Para isso, inicialmente, uma trena foi esticada ao longo da via e, com o auxílio de giz, foram marcados os pontos de distância, como destacado na Figura 4.10. Essas marcações indicaram as linhas de passagem do protótipo, distanciando-se em 70 cm.

Figura 4.10 – Marcação das linhas de passagem

Fonte: o próprio autor

Para o levantamento por foto, foi necessária a participação de, no mínimo, duas pessoas, como demonstrado na Figura 4.11. Durante o processo, um dos integrantes da equipe estendeu uma fita métrica ao longo da via, posicionando-a lateralmente ao protótipo para assegurar o alinhamento preciso ao longo da trajetória linear. Esse membro utilizou também um medidor de distância com rodas para sinalizar cada avanço de 30 cm na direção longitudinal. Simultaneamente, o segundo integrante percorreu a via conduzindo o protótipo VPAIPA e, a cada 30 cm de avanço, captava as imagens utilizando um controle remoto *bluetooth* para o disparo da câmera.

Figura 4.11 – Procedimento de coleta de imagens (foto)



Fonte: o próprio autor

Após a conclusão do levantamento fotográfico, a etapa seguinte foi a coleta de imagens por vídeo (Figura 4.12). Este levantamento pôde ser realizado por um único operador, embora a participação de uma segunda pessoa seja recomendada para otimizar o alinhamento. A via foi previamente demarcada com o máximo de marcações horizontais possíveis, e o operador do VPAIPA percorreu a via em linha reta, a uma velocidade constante, utilizando as marcações como guia para manter o alinhamento. Quando disponível, o segundo operador posicionou-se ao final de cada marcação para auxiliar no alinhamento. O vídeo foi iniciado e finalizado com o uso do controle remoto *bluetooth* acionando a câmera.

Figura 4.12 – Procedimento de coleta de imagens (vídeo)

Fonte: o próprio autor

Em ambos os levantamentos (foto e vídeo), o caminhamento foi realizado em linhas verticais, seguindo um padrão de ziguezague apenas na direção de ida, em função da formação de sombras causadas pelo próprio protótipo. Durante o processo, as imagens foram registradas e a posição do protótipo foi ajustada verticalmente, alterando-se sua localização para a tomada de uma nova sequência de imagens. Esse procedimento foi repetido em todas as linhas de passagem até que toda a área da unidade amostral fosse devidamente coberta, garantindo a obtenção de dados por completo para posterior análise.

O procedimento de fotos e vídeos foi realizado na unidade piloto, que foi subdividida em cinco linhas de passagem, com intervalos regulares de 70 cm entre elas. Para assegurar a precisão e organização durante o levantamento, foram demarcados pontos estratégicos ao longo da via, localizados no início (1A, 2A, 3A, 4A, 5A), no meio (1B, 2B, 3B, 4B, 5B) e no final (1C, 2C, 3C, 4C, 5C) das linhas de passagem, conforme ilustrado na Figura 4.13.

Figura 4.13 – Marcações das linhas de passagem

Fonte: o próprio autor

Esses pontos de distâncias de 70 cm foram usados como pontos de referência e escala no processamento das imagens, servindo como pontos de controle, já que as imagens não foram consideradas com georreferenciamento. Com a unidade piloto finalizada e as decisões tomadas, foi realizado o levantamento nas demais unidades dos trechos selecionados

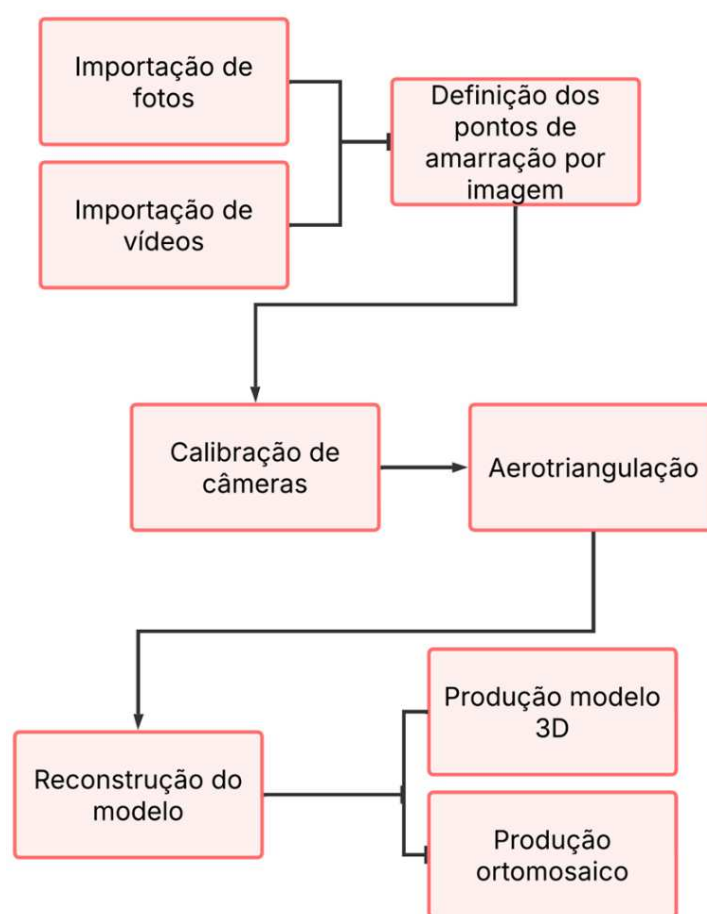
Inicialmente, foram estabelecidos parâmetros de sobreposição entre as imagens, com o objetivo de garantir uma cobertura adequada da área estudada. Na unidade piloto, esses parâmetros foram aplicados tanto para as fotos quanto para os vídeos, considerando as dimensões do campo de visão da câmera. Esse processo foi testado na unidade piloto, UA 144, sendo posteriormente aplicado nas demais unidades do estudo.

4.4 PROCESSAMENTO DE IMAGENS

As imagens coletadas durante o levantamento em campo foram importadas para o *software* de processamento fotogramétrico, que possibilitou a reconstrução tridimensional e a geração do ortomosaico da unidade estudada para análise detalhada das características observadas. O uso do *iTwin Capture Modeler* foi fundamental para garantir a precisão e a qualidade do produto final.

O *iTwin Capture Modeler* é uma ferramenta acessível e versátil, projetada para profissionais de diversas áreas, que permite a criação de modelos 3D detalhados, nuvens de pontos e ortofotos a partir de diversos dispositivos. Para a produção das representações, seguiu-se uma sequência ilustrada no fluxograma da Figura 4.14, desde a importação das imagens até a geração do produto fotogramétrico, conforme detalhado.

Figura 4.14 – Etapas para a produção de modelo 3D e ortomosaico no *iTwin Capture Modeler*



Fonte: o próprio autor

A correta execução dessas etapas foi determinante para a obtenção de resultados confiáveis, viabilizando uma representação precisa das condições do pavimento analisado. Dessa forma, a metodologia adotada possibilitou a obtenção de informações detalhadas sobre a superfície estudada, permitindo uma avaliação técnica mais aprofundada.

4.4.1 Calibração de Câmeras

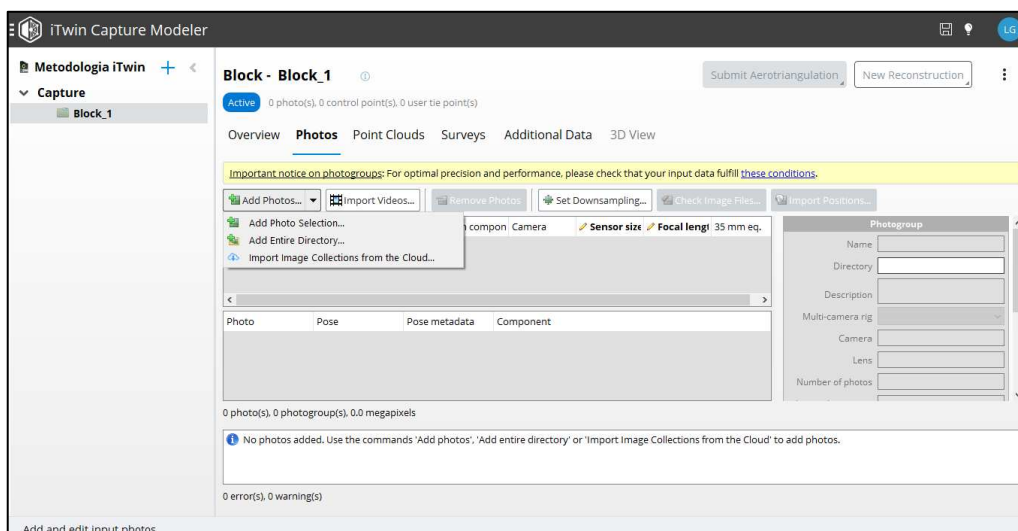
Antes do processamento das imagens coletadas do pavimento, foi necessário realizar a calibração dos dados ópticos da câmera para evitar distorções abauladas e ambiguidades durante o ajuste computacional dos parâmetros de distorção radial. A calibração foi realizada com um levantamento básico, utilizando fotos ou vídeos ao redor de um objeto complexo e altamente texturizado.

Assim, foi realizada a aquisição das imagens, que foram capturadas em um intervalo de 360 graus ao redor do objeto, com a câmera posicionada em diferentes orientações (horizontal e vertical) durante a captura. Após a coleta, as imagens foram processadas no *iTwin Modeler Master* e realizado o processo de aerotriangulação, mantendo as configurações definidas como padrão. Por fim, os parâmetros de calibração foram armazenados no banco de dados do usuário.

4.4.2 Geração do Modelo 3D e do Ortomosaico

Com a calibração da câmera feita, foi criado um novo projeto no *software* para iniciar o processo de aerotriangulação. As imagens capturadas foram importadas (Figura 4.15) e, no caso de vídeos, foi possível configurar o intervalo de segundos para a extração de cada frame. Após a importação das imagens ou vídeos, as informações da câmera, como formato do sensor e distância focal, foram carregadas a partir da calibração previamente realizada.

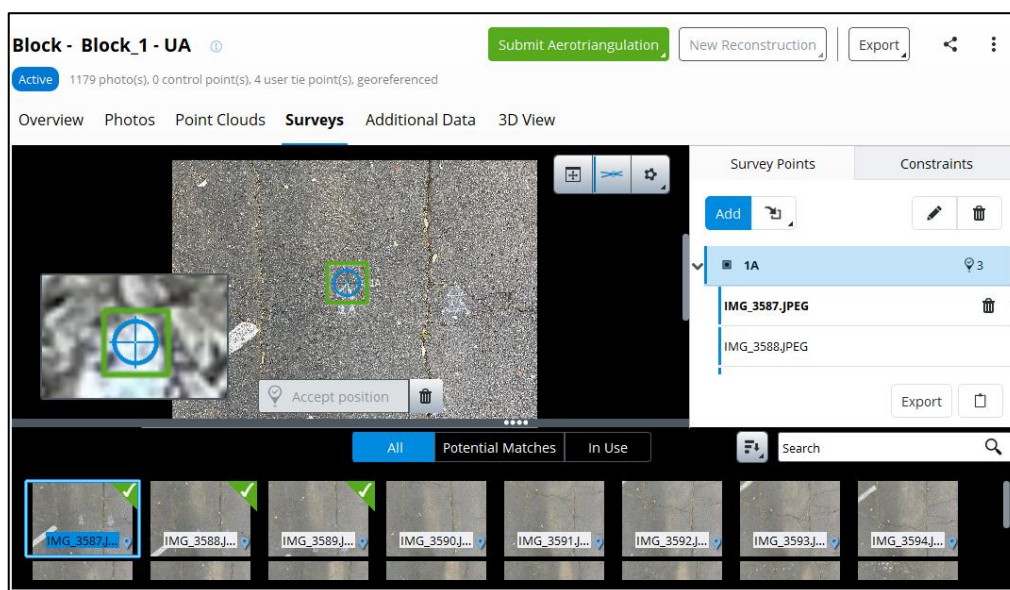
Figura 4.15 – Interface inicial do iTwin Capture Modeler



Fonte: o próprio autor

Em seguida, a escala do modelo foi definida por meio da adição de pontos de amarração, “*Survey Point*”, já que não foram utilizados pontos de controle georreferenciados. Para isso, foi utilizada a distância conhecida entre as linhas de passagem de 70 cm. Esses pontos foram posicionados manualmente para coincidir com as marcações de referência feitas em campo, conforme mostrado na Figura 4.16.

Figura 4.16 – Pontos de amarração para definição de escala

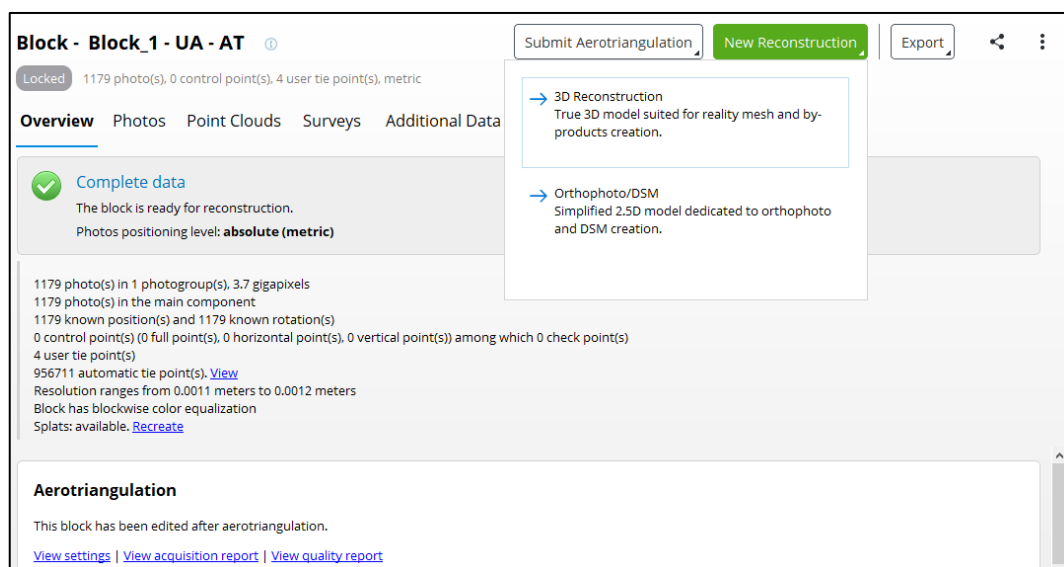


Fonte: o próprio autor

Após a definição da escala, o processo de aerotriangulação foi iniciado, ajustando os parâmetros específicos da câmera e de posicionamento. Concluído o processo de aerotriangulação, um bloco resultado foi gerado, permitindo a visualização e análise dos pontos alinhados. O relatório de qualidade da aerotriangulação foi consultado para verificar a precisão do alinhamento.

Com o bloco gerado, o processo de reconstrução do modelo foi iniciado, como identificado na Figura 4.17. O avaliador teve a opção de escolher duas abordagens principais: "*3D Reconstruction*" para criar um modelo tridimensional ou "*Orthophoto/DSM*" para gerar ortomosaicos e Modelos Digitais de Superfície (DSM), conforme a finalidade do produto final.

Figura 4.17 – Reconstrução modelo e ortomosaico



Fonte: o próprio autor

Durante essa etapa, foi configurada a delimitação da área de interesse e a subdivisão em blocos compatíveis com a memória RAM do computador, com o objetivo de otimizar o processamento. A exportação do modelo final foi realizada ao optar pela criação de um modelo 3D, o formato do modelo foi definido como "*Export 3D Mesh*", enquanto a opção de ortomosaico utilizou o formato "*Orthophoto: TIFF/GeoTIFF*".

Concluído o processamento, as representações foram geradas, representando o pavimento e possibilitando a visualização precisa e detalhada

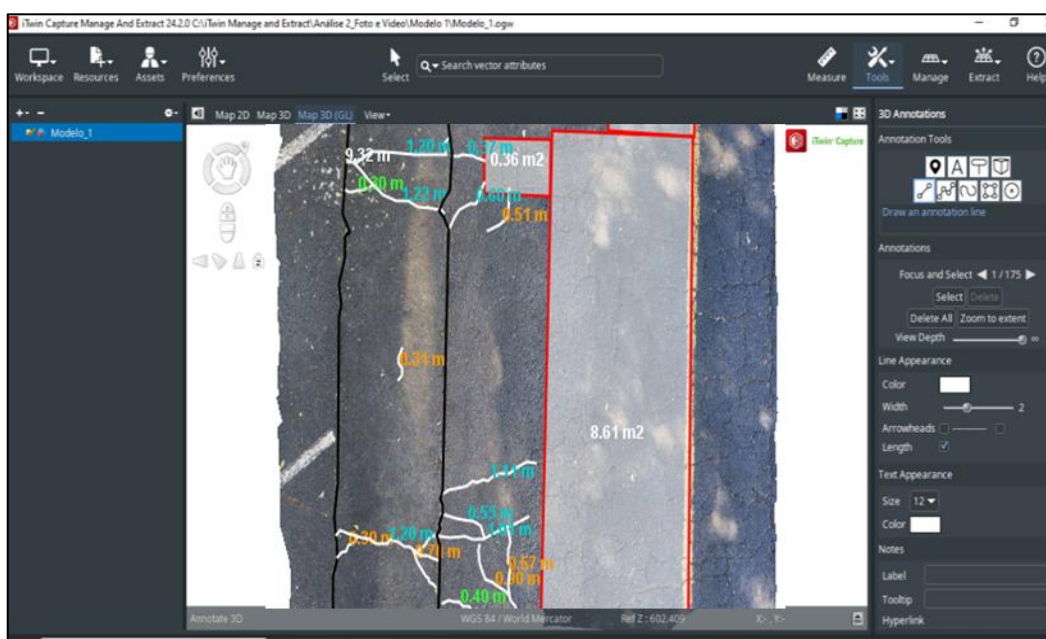
do espaço modelado. Com os modelos tridimensionais e os ortomosaicos devidamente processados, a etapa seguinte consistiu na obtenção dos dados relativos aos defeitos para a avaliação da condição do pavimento. A análise dos produtos fotogramétricos gerados permitiu a mensuração de defeitos para comparação com os dados coletados em campo.

4.5 OBTENÇÃO DOS DADOS RELATIVOS AOS DEFEITOS NO MODELO 3D E ORTOMOSAICOS

Com a finalidade de identificar e quantificar os tipos, as dimensões e as severidades dos defeitos encontrados no modelo 3D e nos ortomosaicos, foram utilizados dois *softwares*: *iTwin Manage And Extract* e AutoCAD. Cada ferramenta desempenhou um papel essencial na obtenção e análise dos dados, sendo suas funcionalidades descritas a seguir.

Após a finalização do modelo realista 3D da via, gerado no formato .3sm, o arquivo foi importado para o *iTwin Manage And Extract*. Este *software* permitiu a manipulação e obtenção detalhada dos dados, utilizando ferramentas de desenho e anotações disponíveis da plataforma, como apresentado na Figura 4.18.

Figura 4.18 – Interface *iTwin Manage And Extract*



Fonte: o próprio autor

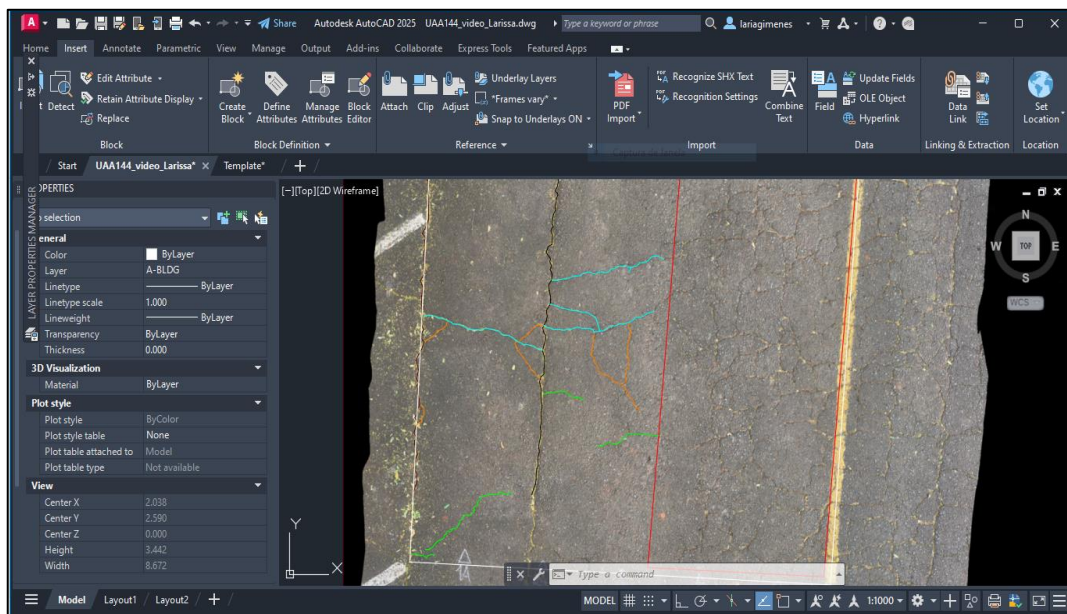
Além disso, foi considerada uma abordagem alternativa para a obtenção de dados, utilizando o ortomosaico gerado no formato .tiff, resultado do processamento das imagens. No entanto, este formato não pôde ser aberto diretamente no AutoCAD, devido a uma incompatibilidade entre a compressão ou configuração do arquivo .tiff gerado pelo *iTwin Capture Modeler*.

Essa incompatibilidade pode ser explicada pelas diferenças fundamentais entre imagens raster e modelos vetoriais. O formato .tiff, sendo raster, representa informações visuais da realidade sem conter dados geométricos precisos dos objetos, enquanto o formato vetorial utilizado no AutoCAD se baseia em coordenadas matemáticas que descrevem com exatidão os dados geométricos dos objetos representados.

Para contornar essa limitação, foi utilizado o programa *GIMP* para converter o arquivo .tiff em .png, que apresentou maior compatibilidade com o AutoCAD. Durante a importação do arquivo .png, foi utilizado o comando “*ATTACH*” para posicionar a imagem no ambiente de trabalho. Em seguida, ajustou-se a escala com o comando “*SCALE*”, permitindo a visualização detalhada da imagem e a realização das demarcações necessárias.

No AutoCAD, com o auxílio das ferramentas de desenho, foram criadas polilinhas e polígonos sobre os defeitos identificados no pavimento, possibilitando a mensuração dos comprimentos e áreas dos mesmos, como na imagem da Figura 4.19.

Figura 4.19 – Interface AutoCAD



Fonte: o próprio autor

Em ambas as plataformas utilizadas para medição, *iTwin Manage And Extract* e AutoCAD, os defeitos foram classificados por meio de *layers* e diferenciados por cores, de acordo com o tipo e a severidade do defeito. Essa padronização, como exemplificado na Figura 4.20, garantiu maior clareza na organização e análise das informações extraídas dos modelos.

Figura 4.20 – Cores diferenciadas por tipo e severidade do defeito

	BURACO SEVERIDADE BAIXA
	BURACO SEVERIDADE MÉDIA
	DESGASTE SEVERIDADE BAIXA
	DESGASTE SEVERIDADE MÉDIA
	EMPOLAMENTO SEVERIDADE BAIXA
	EMPOLAMENTO SEVERIDADE ALTA
	REMENDO SEVERIDADE BAIXA
	REMENDO SEVERIDADE MÉDIA
	REMENDO SEVERIDADE ALTA
	TRINCA DE BORDA SEVERIDADE ALTA
	TRINCA LONGITUDINAL E TRANSVERSAL SEVERIDADE BAIXA
	TRINCA LONGITUDINAL E TRANSVERSAL SEVERIDADE MÉDIA
	TRINCA LONGITUDINAL E TRANSVERSAL SEVERIDADE ALTA
	TRINCA POR FADIGA SEVERIDADE BAIXA
	TRINCA POR FADIGA SEVERIDADE MÉDIA
	TRINCA POR FADIGA SEVERIDADE ALTA

Fonte: o próprio autor

Após a identificação e delimitação dos defeitos, foram anotadas as dimensões das medidas diretamente nos *softwares*, possibilitando a quantificação precisa de cada defeito. Durante a análise da unidade piloto, ambos os *softwares* foram testados para avaliar qual deles oferecia maior eficiência e praticidade na mensuração dos dados. O *software* mais adequado foi então aplicado às demais unidades estudadas, assegurando consistência no processo de medição e análise.

Com esses processos concluídos, foi possível avançar para a etapa de avaliação da condição do pavimento, tanto subjetiva quanto objetiva. Essa fase envolveu o levantamento de defeitos por meio de inspeção *in loco* e o levantamento de defeitos nos ortomosaicos.

4.6 AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DO PAVIMENTO

O processo de avaliação da condição da superfície do pavimento dos dois trechos analisados no campus da UEL foi realizado de forma subjetiva e objetiva. Os levantamentos foram realizados de maneira presencial (*in loco*) e em escritório, por meio da análise das imagens geradas a partir dos ortomosaicos.

As coletas de dados foram conduzidas aos finais de semana, preferencialmente nas manhãs de domingo. A escolha desse período visou minimizar interrupções devido ao baixo fluxo de veículos, além de garantir a segurança dos avaliadores e a continuidade das atividades em condições meteorológicas favoráveis.

Esses procedimentos permitiram uma execução eficiente do levantamento e criaram as condições necessárias para uma análise comparativa entre os resultados obtidos manualmente e os dados derivados da classificação supervisionada de imagens.

4.6.1 Avaliação Subjetiva

A avaliação subjetiva da condição do pavimento foi realizada com base nas especificações da norma 009/2003-PRO (DNIT, 2003b). Para atender aos objetivos da pesquisa, foram feitos ajustes no procedimento recomendado, como a realização da avaliação por meio de inspeção a pé e a atribuição de notas em uma escala de 0 a 100 pontos.

Essa etapa contou com a participação de um painel formado por cinco avaliadores, todos discentes de graduação e pós-graduação em engenharia civil da instituição, com pesquisas em andamento na área. Os avaliadores receberam instruções básicas sobre o processo, sendo orientados a avaliar exclusivamente a situação do pavimento, sem considerar influências externas ou trocar informações durante a execução das atividades.

O procedimento foi estruturado para garantir uniformidade e imparcialidade nas análises. Em um primeiro momento, a avaliação foi realizada por caminhada *in loco*, assim, os avaliadores caminharam juntos pelas 6 unidades amostrais correspondentes ao trecho C, evitando qualquer tipo de

interação quanto à qualidade e o conforto proporcionado por cada UA para que não influenciasse a percepção individual de cada um.

Cada avaliador recebeu um formulário individual (Figura 4.10), no qual foi utilizada uma escala de notas padronizada de 0 a 100, representando a condição percebida do pavimento, onde 0 indicava um estado péssimo e 100, excelente. As avaliações foram feitas com base no desconforto percebido durante a caminhada, sendo cada UA avaliada independentemente, sem considerar a nota atribuída à UA anterior.

Figura 4.21 – Formulário para avaliação subjetiva

AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE DE ESTRADAS PAVIMENTADAS					
CLASSIFICAÇÃO SEM ESCALA VISUAL					
Avaliador:					
Data:	Hora início:	Hora término:			
Escala de notas para classificação da condição da superfície da estrada:					
100		Excelente			
85		Muito boa			
70		Boa			
55		Regular			
40		Ruim			
25		Muito ruim			
10		Péssima			
0					
N° UA	Nota	N° UA	Nota	N° UA	Nota
01		26		54	
02		25		53	
03		24		52	
04		23		51	

Fonte: Pereira (2019)

Posteriormente, a avaliação subjetiva foi feita em escritório, mas agora analisando os ortomosaicos gerados para cada UA do trecho C. Participaram cinco avaliadores, dos quais quatro haviam participado da avaliação *in loco*. Entre a realização da avaliação em campo e a aquisição das imagens, houve um

intervalo de três meses, e entre a aquisição das imagens e a avaliação feita em escritório, o intervalo foi de quatro meses.

Para tanto, um formulário digital foi elaborado no *Google Forms*. O formulário continha os mesmos critérios e escalas de notas adotadas na avaliação presencial, mantendo a consistência metodológica entre as duas abordagens. Cada avaliador recebeu um link contendo as instruções para atribuir a nota de cada UA, sendo que o formulário foi estruturado para apresentar cada unidade individualmente, minimizando possíveis influências entre as avaliações.

Além disso, cada página do formulário incluía um link que direcionava o avaliador a uma pasta com o arquivo do ortomosaico da UA no *software* AutoCAD. Essa estratégia garantiu a preservação da qualidade visual necessária para a análise, permitindo que os avaliadores realizassem uma avaliação detalhada e individualizada de cada UA, sem interferências externas. A Figura 4.22 e a Figura 4.23 apresentam o modelo do formulário digital utilizado nessa etapa.

Figura 4.22 – Formulário para avaliação subjetiva por meio de imagens

FORMULÁRIO AVALIAÇÃO SUBJETIVA

Avaliação subjetiva por meio de imagens que representam a condição do pavimento

larissa.gimenes@uel.br [Mudar de conta](#)

✉ Não compartilhado

* Indica uma pergunta obrigatória

Nome do avaliador *

Sua resposta

Utilize a escala de classificação abaixo para dar sua nota para a imagem. A nota atribuída pode ser de 0 a 100, onde 0 identifica a pior situação do pavimento e 100 a melhor.

Escala de notas para classificação da condição da superfície da estrada:

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

Fonte: o próprio autor

Figura 4.23 – Continuação do formulário para avaliação subjetiva

Imagem a ser avaliada
UA
139: https://drive.google.com/file/d/1HD_HOZZZw8ZAEe8EizF9HvuUPvHhFWDQ/view?usp=drive_link

UA 139 - Qual a sua nota para a classificação do pavimento? *

Sua resposta

Próxima Limpar formulário

Nunca envie senhas pelo Formulários Google.

Este formulário foi criado em Universidade Estadual de Londrina.
Does this form look suspicious? [Relatório](#)

Google Formulários

Fonte: o próprio autor

As avaliações subjetivas, realizadas tanto *in loco* quanto remotamente (em escritório), permitiram identificar as percepções individuais e visuais sobre o pavimento. No entanto, para complementar essa abordagem, foram realizadas também avaliações objetivas, que buscavam quantificar os defeitos presentes em cada unidade amostral, proporcionando uma análise mais completa e confiável sobre a condição do pavimento.

4.6.2 Avaliação Objetiva

A avaliação objetiva *in loco* e a aquisição das imagens foram iniciadas dois meses após a conclusão das avaliações subjetivas *in loco*, a fim de evitar qualquer influência nos avaliadores ao atribuírem suas notas para cada unidade amostral, preservando a integridade e a independência dos dados coletados em cada uma das abordagens. Essa ordem de realização assegurou que as percepções subjetivas não interferissem na coleta dos dados objetivos.

De forma que a coleta *in loco* de dados dos defeitos foi realizada simultaneamente com a aquisição das imagens ou com intervalos curtos entre elas, de no máximo um mês. Essa estratégia garantiu que ambos os

levantamentos ocorressem sob as mesmas condições temporais, evitando variações externas que pudessem comprometer a comparação entre os defeitos identificados diretamente no campo e aqueles mapeados nas imagens.

A avaliação objetiva foi conduzida coletando dados referentes aos defeitos presentes em cada UA da malha de pavimentos do campus, seguindo o método *Pavement Condition Index* (PCI), conforme descrito na norma ASTM (2024). O PCI é uma ferramenta amplamente reconhecida para quantificar a severidade e a extensão dos defeitos nos pavimentos.

Antes de iniciar a coleta de dados, os avaliadores receberam um manual específico que detalhava os tipos de defeitos considerados no PCI, assim como as diretrizes para sua identificação e classificação. Essa orientação foi essencial para que todos os avaliadores seguissem os mesmos critérios para a detecção dos defeitos.

A identificação dos defeitos foi feita por meio de caminhada, com os avaliadores percorrendo a via do campus e analisando cada uma das 18 UAs dos trechos B e C, que foram considerados nesta pesquisa. Durante o percurso, foram registradas informações detalhadas sobre o tipo, a severidade e a extensão dos defeitos encontrados.

Para a avaliação objetiva nas imagens, seguiu-se o mesmo procedimento adotado em campo, utilizando o método do PCI para a quantificação dos defeitos. Nesse processo, o pesquisador identificou os defeitos presentes nas imagens e anotou o tipo, a extensão e a severidade de cada um, conforme os critérios estabelecidos no manual. As informações foram registradas em formulário igual ao utilizado em campo. Essa metodologia garantiu que as avaliações objetivas realizadas nas imagens fossem consistentes com as observações feitas diretamente no campo, proporcionando uma comparação direta e padronizada entre os dois tipos de levantamento.

A seguir, são detalhados os procedimentos adotados para a análise dos dados nas etapas de teste e validação, assegurando uma abordagem sistemática e coerente com os objetivos do estudo.

4.7 TESTE E VALIDAÇÃO

O procedimento adotado para a avaliação do uso do PAIPA com *smartphone* foi estruturado em duas etapas principais: teste e validação. O objetivo foi transformar os dados coletados e processados em um conjunto de informações organizadas, permitindo a verificação quantitativa dos resultados.

Inicialmente, a etapa de teste compreendeu os procedimentos iniciais realizados na unidade piloto (UA 144) e envolveu as Fases I e II do estudo. Na Fase I, realizou-se a comparação dos modelos 3D a partir de combinações de parâmetros aplicados na aerotriangulação. Já na Fase II, foram comparadas as dimensões dos defeitos identificados.

Posteriormente, a etapa de validação, correspondente à Fase III, consistiu na aplicação do procedimento estruturado em todas as 18 UAs dos trechos B e C. Nessa fase, foram aplicados os índices para a avaliação da condição do pavimento, possibilitando a comparação dos resultados obtidos em campo e em escritório, permitindo a verificação de possíveis discrepâncias.

Dessa forma, a seguir, apresenta-se a descrição detalhada das Fases I, II e III, abordando os procedimentos adotados em cada etapa e os critérios utilizados para a análise dos resultados.

4.7.1 Fase I - Parâmetros de Aerotriangulação

A Fase I, aplicada na etapa de teste da unidade piloto, consistiu na realização de combinações dos parâmetros de aerotriangulação, conforme explicado no tópico 4.4.2, com o objetivo de determinar a configuração mais adequada para ajustar e alinhar as imagens capturadas. Para isso, foram estabelecidas combinações nos parâmetros de posicionamento e georreferenciamento, que definem como a aerotriangulação deve ajustar e orientar o bloco. Além disso, configuraram-se opções para poses, pontos de amarração e ajustes ópticos.

O parâmetro de posicionamento para pontos de amarração foi definido para calcular as posições e os respectivos pontos de amarração. Também foram configurados dois atributos adicionais: o primeiro, relacionado às restrições de ajuste, podendo ser definido com base nos metadados da posição da foto ou

sem qualquer restrição; e o segundo, relativo ao registro rígido final, que pode ser configurado como restrições de posicionamento em pontos de amarração ou nos metadados da posição da foto, permitindo ajustes na posição, orientação e/ou escala.

Os parâmetros específicos da câmera, como distância focal, ponto principal, distorção radial, distorção tangencial, proporção da tela e inclinação, puderam ser ajustados ou mantidos conforme os valores originais. No total, foram testadas 14 combinações de parâmetros de aerotriangulação, cujos detalhes estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Configurações dos parâmetros de aerotriangulação

Modelo	Posicionamento e georreferenciamento		Ajuste óptico	
	Restrições de ajuste	Registro rígido final	Distância focal e distorções	Proporção e inclinação
1	nenhum	restrições de registro	manter	manter
2	nenhum	restrições de registro	ajustar	manter
3	metadados	restrições de registro	ajustar	manter
4	metadados	restrições de registro	manter	manter
5	nenhum	restrições de registro	ajustar	manter
6	nenhum	restrições de registro	ajustar	manter
7	nenhum	restrições de registro	ajustar	manter
8	nenhum	metadados e restrições de registro	ajustar	manter
9	nenhum	metadados e restrições de registro	ajustar	manter
10	nenhum	metadados e restrições de registro	ajustar	manter
11	nenhum	nenhum	ajustar	manter
12	nenhum	nenhum	manter	manter
13	nenhum	metadados	ajustar	manter
14	metadados	metadados	ajustar	manter

Fonte: o próprio autor

Após a definição dessas configurações, foram gerados os modelos 3D referentes à unidade piloto, os quais foram submetidos ao processo de aerotriangulação. A partir disso, realizou-se a análise desses modelos, considerando o relatório de qualidade gerado após a aerotriangulação. Com base nesse relatório, avaliaram-se a qualidade do ajuste geométrico e a precisão do modelo em relação ao solo.

O ajuste geométrico foi avaliado com base nos menores valores de "*Reprojection Error (RMS)*" e o "*Median Reprojection Error*", o primeiro atributo diz sobre o erro médio quadrático do erro das reprojeções e o segundo do erro da mediana das reprojeções.

Já a precisão do solo foi analisada considerando os menores valores em "*Average Ground Resolution*" e "*RMS of Distances to Rays*", que tratam da resolução média do solo e do erro médio quadrático da distância dos raios. O erro nos "*Surveys*" diz sobre a distância entre a posição 3D fornecida pelos pontos de amarração inseridos manualmente e a posição 3D estimada pelo *software*.

A seguir, a fase inicial da análise constituiu-se na triagem visual dos modelos 3D utilizando o *software iTwin Capture Desktop Viewer*. Modelos com formato curvo ou orientação incorreta foram descartados. Em seguida, foi determinada a precisão de cada modelo por meio da comparação entre as medidas obtidas em campo e as extraídas dos modelos 3D. Para essa comparação, foram analisadas dezesseis medidas delimitadas na unidade, abrangendo distâncias entre as linhas de passagem e extensões de trincas identificadas nos modelos 3D gerados.

Na sequência, realizou-se uma análise estatística, na qual foram calculadas a Soma das Diferenças Absolutas (SOMA), o Erro Absoluto Médio (MAE) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE). Com os resultados obtidos, foram aplicados testes de hipóteses, cujos detalhes estão descritos no tópico 4.7.4, a fim de identificar qual modelo 3D mais se aproximava das medidas reais da via. Esse modelo foi selecionado para dar continuidade ao estudo.

Com a definição dos parâmetros de aerotriangulação desse modelo 3D, deu-se início à Fase II, na qual foram comparados os *softwares* utilizados e o procedimento de levantamento para aquisição de imagens.

4.7.2 Fase II - Comparações entre as Dimensões dos Defeitos

Na segunda fase, foi elaborado um croqui da unidade piloto, indicando os valores das dimensões e as localizações dos defeitos coletados *in loco*, incluindo o tipo, severidade e extensão. Essas informações foram comparadas com os resultados obtidos por meio dos modelos 3D e ortomosaicos gerados para o

teste do método. A análise foi realizada sob dois aspectos principais: a comparação entre os diferentes *softwares* utilizados para medição e a análise dos procedimentos de aquisição de imagens por foto e por vídeo.

Inicialmente, foram verificados quais defeitos foram corretamente localizados e, em seguida, foram analisadas as somatórias das dimensões dos defeitos no modelo 3D e nos ortomosaicos, comparando-as com os valores coletados *in loco*. Além dessas comparações, foram aplicados testes de hipóteses e calculado o coeficiente de correlação.

Essas análises foram feitas na unidade piloto e permitiram avaliar qual *software* (*iTwin* ou AutoCAD) apresentou maior semelhança com os dados coletados em campo e definir o método de aquisição das imagens (foto ou vídeo) mais adequado a ser aplicado nas demais unidades selecionadas do campus, garantindo a consistência e a qualidade dos dados coletados ao longo do estudo.

Com essas definições estabelecidas, finalizou-se a fase de teste na unidade piloto e deu-se início à fase de validação nas demais unidades, na qual foram obtidos os índices para avaliação da condição do pavimento.

4.7.3 Fase III – Avaliação da Condição do Pavimento

A Fase III desta pesquisa foi referente à validação da adaptação do PAIPA para uso de *smartphones* na coleta de imagens. Para tanto, foi realizado o cálculo dos índices de condição dos pavimentos das UAs dos trechos B e C tanto por avaliações subjetivas como objetivas conduzidas presencialmente em campo (*in loco*) e em escritório a partir das imagens.

A avaliação objetiva resultou na determinação do Índice do PCI. Após a identificação dos defeitos e suas respectivas severidades, os cálculos seguiram os critérios estabelecidos pela norma ASTM (2024). Nos casos em que um mesmo defeito apresentava mais de uma severidade, foram aplicados ajustes para determinar o PCI final. Para isso, foram realizados novos cálculos considerando diferentes combinações de severidades: baixa e média, baixa e alta, média e alta, além da combinação de todas (baixa, média e alta) e também do valor calculado sem combinações. Dentre os cinco valores obtidos, adotou-se o maior como representativo da UA analisada.

Com base nesses resultados, calculou-se a média dos valores para os trechos correspondentes. A partir desses resultados, as UAs e os respectivos trechos foram classificados quanto à condição do pavimento, de acordo com os critérios de classificação apresentados na Figura 2.1.

Por meio da análise gráfica, testes de hipótese e correlação, foram realizadas as seguintes comparações: $ICP_{subj_in\ loco}$ com ICP_{subj_imagem} para as unidades do trecho C, e $PCI_{in\ loco}$ com PCI_{imagem} para as unidades dos trechos B e C.

4.7.4 Análise Estatística Usada para Teste e Validação

A análise estatística foi realizada utilizando diferentes ferramentas para avaliar a precisão dos modelos 3D e dos ortomosaicos, além de verificar a confiabilidade dos resultados obtidos.

- Análise dos erros

A SOMA representa o valor total acumulado das diferenças absolutas entre os valores reais (VR) e os valores estimados (VE) para n observações, correspondendo ao erro acumulado total, conforme Equação 2.

$$SOMA = \sum |VR - VE| \quad (2)$$

O MAE expressa a média das diferenças absolutas entre os VR e VE, indicando a magnitude média dessas discrepâncias, conforme a Equação 3.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |VR - VE| \quad (3)$$

Já o RMSE avalia a magnitude média dos erros entre os VR e VE, considerando a raiz quadrada da média das diferenças quadráticas, conforme a Equação 4.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (VR - VE)^2} \quad (4)$$

Menores valores de SOMA, MAE e RMSE indicam maior aproximação entre os valores estimados pelos modelos e os valores reais da via.

- Teste de hipóteses

Para verificar a equivalência estatística entre os dados, foram realizados testes de hipóteses. O teste de normalidade de Shapiro-Wilk foi utilizado para analisar a distribuição dos dados e verificar a normalidade do conjunto de informações. Este método foi realizado baseado na estatística W e as hipóteses associadas a este teste são:

H_0 : Os dados seguem uma distribuição normal;

H_1 : Os dados não seguem uma distribuição normal.

Adotou-se o critério de que, se o p-valor resultante do teste for menor ao nível de significância preestabelecido de 0,05 ($\alpha = 5\%$), a hipótese nula foi rejeitada, indicando que os dados não seguem uma distribuição normal. Caso o p-valor fosse maior que 0,05, não haveria evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula, concluindo que não havia diferença significativa entre as duas amostras. Assim, pode-se seguir para a aplicação dos testes de comparação.

Para os dados não paramétricos, ou seja, aqueles que não seguem uma distribuição normal, foi utilizado o teste de Friedman para comparações entre mais de duas amostras dependentes ou pareadas e o teste de Friedman para a comparação entre duas amostras dependentes. Enquanto para dados paramétricos, utilizou-se o teste t pareado ou *t-Student* para duas amostras dependentes. Testes de comparações múltiplas baseados em análises *post-hoc* entre cada par de dados foram realizados quando necessário. Assim, para um nível de significância de 0,05 ($\alpha = 5\%$), foram analisadas as seguintes hipóteses para esses testes:

H_0 : Não existe diferença significativa entre os dados comparados;

H_1 : Existe diferença significativa entre os dados comparados.

A aceitação ou não da hipótese nula foi verificada por meio do p-valor, com as seguintes considerações:

p-valor $> 0,05$: hipótese H_0 foi aceita;

p-valor $\leq 0,05$: hipótese H_1 foi aceita;

- Teste de correlação

Adicionalmente, foi realizado o teste de correlação para garantir uma compreensão mais detalhada das interações entre os dados comparados. Trata-se de um teste estatístico que mede a relação entre duas ou mais variáveis. Foi utilizado o de Person para dados contínuos e que seguem uma distribuição normal e Spearman para dados não paramétricos.

O coeficiente de correlação, R , indica a direção e a força da relação entre as variáveis. Este teste fornece um coeficiente que varia de -1 a 1 , onde -1 indica uma correlação negativa perfeita, 0 indica nenhuma correlação e 1 que há uma correlação positiva perfeita, o que significa que as variáveis se movem na mesma direção.

Realizou-se também análises com o gráfico de dispersão para conseguir identificar a relação entre duas ou mais variáveis, sendo uma variável independente (eixo x) e a outra dependente (eixo y) da primeira.

- Comparação gráfica

Com os resultados obtidos, foi possível compará-los por meio de representações gráficas, utilizadas como uma abordagem visual para a interpretação dos conjuntos de informações. Através de boxplots, gráficos de dispersão e gráficos de barras, os resultados *in loco* foram confrontados com aqueles obtidos a partir das imagens, permitindo uma análise mais clara das variações e tendências identificadas.

Assim, os procedimentos estatísticos adotados asseguraram a precisão dos modelos 3D e dos ortomosaicos. A combinação dessas abordagens permitiu identificar a adequação dos produtos fotogramétricos, contribuindo para a validação do método fotogramétrico. O próximo capítulo aborda a apresentação e análise desses resultados obtidos.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste tópico, apresentam-se os resultados obtidos com o procedimento metodológico adotado, acompanhados da respectiva análise. Inicialmente, foram conduzidos testes introdutórios na unidade piloto, essenciais para investigações preliminares. Esses testes permitiram avaliar a eficácia das estratégias adotadas e assegurar que os métodos empregados gerassem resultados satisfatórios.

Com base nas análises na unidade piloto, foram definidos os parâmetros e procedimentos a serem aplicados nas demais unidades. A partir desse ponto, avançou-se para a fase de validação, que teve como objetivo comprovar ou refutar as decisões tomadas, garantindo a eficácia das abordagens adotadas.

5.1 TESTE PILOTO

O estágio relativo ao teste piloto da pesquisa foi conduzido apenas com as informações coletadas na UA 144 (unidade piloto). Ele abrangeu o procedimento integral nessa UA, incluindo: *i*) a coleta das imagens, *ii*) a definição dos parâmetros de aerotriangulação no processamento de tais imagens, visando a geração dos modelos 3D e ortomosaicos, *iii*) a comparação entre as medidas obtidas em campo e nas imagens, *iv*) a escolha do *software* apropriado para a identificação e mensuração dos defeitos (*iTwin Manage And Extract* ou AutoCAD), e *v*) a seleção do melhor formato de imagens (fotos ou vídeos) para a produção dos modelos 3D e ortomosaicos.

5.1.1 Definição dos Parâmetros de Aerotriangulação para Geração dos Modelos 3D – Fase I

Conforme abordado no método desta pesquisa, as imagens do pavimento foram feitas seguindo dois formatos: fotografias e vídeos. Na calibração da câmera do *smartphone*, para executar a coleta das imagens por fotos, foram utilizadas 91 fotografias; já no método de coleta por vídeo, um único vídeo foi utilizado para calibrar a câmera. No que diz respeito à geração do modelo tridimensional usando as fotos, foram necessárias 1179 fotografias, enquanto o

modelo gerado com vídeo da via contou com cinco vídeos, cada um correspondente a uma linha de passagem demarcada no levantamento.

No total, foram processados 14 modelos 3D da via, diferindo as configurações de aerotriangulação, como explicado no tópico 4.7.1. Os resultados obtidos para cada configuração estão elencados na Tabela 5.1, destacando-se os parâmetros que apresentaram os menores valores e, conseqüentemente, melhor desempenho no processamento.

Tabela 5.1 – Resultados do relatório de qualidade do processo de aerotriangulação

Modelo	Reprojection error - RMS (pixels)	Median Reprojection Error (pixels)	Average ground resolution (mm/pixel)	RMS of Distances to Rays (m)	Error Surveys(cm)	
1	0,3800	0,2500	1,1489	0,0015	0,0089	0,0089
2	0,3700	0,2500	1,1468	0,0004	1,3581	1,4130
3	0,3700	0,2500	1,1466	0,0004	1,4305	1,4915
4	0,4000	0,2800	1,1486	0,0015	4,9424	5,7664
5	0,3800	0,2600	1,1345	0,0004	4,9424	5,7664
6	0,4300	0,2900	1,1340	0,0007	5,0438	5,9054
7	0,3700	0,2500	1,1428	0,0008	4,1668	4,7352
8	0,3700	0,2500	1,1468	0,0004	1,3607	1,4157
9	0,3700	0,2500	0,0006	0,0002	-	-
10	0,3700	0,2500	0,0006	0,0002	31,8761	33,361
11	0,3700	0,2500	0,0096	0,0033	-	-
12	0,3800	0,2500	0,0097	0,0130	-	-
13	0,3700	0,2500	1,2009	0,0004	-	-
14	0,3700	0,2500	1,2018	0,0004	-	-

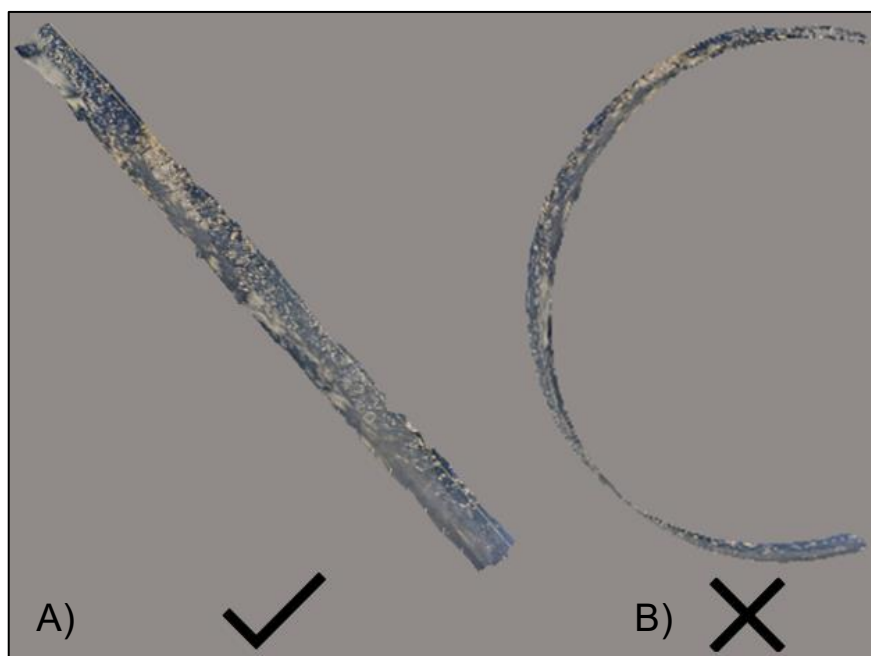
Fonte: o próprio autor

Os valores das duas primeiras colunas variam entre 0,37 e 0,43 pixels, sendo que os modelos 2, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 13 e 14 apresentaram os menores valores em ambos os critérios, indicando um melhor ajuste geométrico das imagens. Além disso, a resolução média do terreno variou entre 1,13 e 1,20 mm/pixel, com os menores valores observados nos modelos 9 a 12, sugerindo maior precisão espacial. Essas variações podem ser atribuídas a pequenas diferenças no processamento e a configurações distintas utilizadas na aerotriangulação.

No que foi observado no RMS das distâncias dos raios, a maioria dos modelos 3D apresentou um bom ajuste dos pontos reconstruídos às imagens. Entretanto, os modelos com valores mais altos (0,0013 a 0,0008) podem apresentar uma ligeira perda de precisão. Já a análise dos pontos de amarração revelou que os modelos 1, 8 e 3 possuem erros baixos (da ordem de milímetros ou poucos centímetros), indicando boa precisão na amarração dos pontos de controle. Em contrapartida, os modelos 4, 5, 6 e 7 apresentaram erros superiores a 4 cm, chegando a 5,9 cm, o que pode indicar problemas no ajuste dos pontos de controle ou no próprio processo de aerotriangulação. O modelo 10 apresentou um erro ainda mais alto (31,87 cm), o que pode indicar uma falha grave no ajuste dos pontos de controle.

Com base nesses critérios, foram gerados os 14 modelos 3D. A partir de uma análise visual detalhada, foi realizada a seleção dos modelos mais adequados, resultando na exclusão de 10 modelos e na manutenção de 5, conforme ilustrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Exemplo de visualização dos modelos 3D: Aceito A); Rejeitado B)



Fonte: o próprio autor

A partir dessa seleção, as próximas comparações foram conduzidas exclusivamente com esses cinco modelos 3D finais. Os dados obtidos foram

organizados de maneira a apresentar as dimensões identificadas *in loco* e por imagem nos modelos avaliados. Com base nesses valores, foi realizada a primeira análise estatística, em que foi calculada a Soma das Diferenças Absolutas (SOMA), o Erro Absoluto Médio (MAE) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) de cada modelo 3D em relação às medidas realizadas *in loco*, conforme descrito na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Análise estatística dos erros do processo de aerotriangulação

Modelo	Método		
	SOMA	MAE	RMSE
Modelo 2	0,180	0,011	0,016
Modelo 8	4,420	0,276	0,286
Modelo 11	81,130	5,071	5,213
Modelo 13	3,820	0,239	0,251
Modelo 14	3,730	0,233	0,244

Fonte: o próprio autor

Observou-se que, na soma das diferenças absolutas entre as distâncias, os valores variam significativamente. O menor valor registrado foi de 18 centímetros, enquanto o maior foi de 81 metros. Os outros três modelos apresentam variações entre 3 e 5 metros, refletindo as discrepâncias nos ajustes realizados durante o processamento dos modelos 3D.

Na análise do MAE, que representa o quão próximo, em média, as proporções de cada modelo 3D estão em relação às distâncias de referência, o modelo 2 foi o que mais se aproximou das distâncias de referência, apresentando o menor valor de MAE (0,011). Esse resultado indica que, em média, as medidas de distâncias desse modelo 2 são as mais próximas dos valores de referência, considerando as 16 medições diferentes realizadas.

De forma semelhante, a análise do RMSE complementar ao MAE, mas enfatiza ainda mais os erros maiores. O modelo 2 também apresentou o menor valor (0,016), o que reforça que as diferenças entre esse modelo e as distâncias de referência são pequenas. Como foi observado na Tabela 5.2, os valores de RMSE variam entre 16 mm e 29 cm, com exceção do modelo 11, que apresentou

um RMSE superior a 5 metros, indicando um erro significativamente maior em comparação com os demais modelos.

Diante disso, para a próxima análise, foi adotado como critério de referência um erro de até 0,3 m no RMSE, considerando que os modelos com esse valor podem ser considerados com precisão suficiente. Assim, a próxima análise estatística foi realizada com os quatro modelos 3D, excluindo o modelo 11, que apresentou um desempenho inferior aos critérios estabelecidos.

A segunda análise foi realizada aplicando inicialmente o teste de normalidade pelo método Shapiro-Wilk. Os dados foram analisados e os resultados indicaram que, para todos os modelos, o p-valor foi menor que 0,001. Isso resultou na rejeição da hipótese nula ($p\text{-valor} < \alpha$), indicando que os dados não seguem uma distribuição normal.

Com base nesse resultado, foi utilizado o teste de Friedman, que foi adequado para a análise de medições repetitivas (não paramétricas). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Análise estatística do processo de aerotriangulação: teste de Friedman

Informação	Resultado
Friedman qui-quadrado	59,9
Graus de liberdade	4
p-valor	< .001

Fonte: o próprio autor

Como pode ser observado, o p-valor de 0,001 é menor que o nível de significância adotado (0,05), o que fornece uma forte evidência contra a hipótese nula. Esse resultado sugere que existe uma diferença significativa em pelo menos um dos modelos. Dessa forma, o método *Durbin-Conover* foi aplicado para realizar comparações entre os pares de modelos, como apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Análise estatística do processo de aerotriangulação: teste de comparações múltiplas

	Modelo 2	Modelo 8	Modelo 13	Modelo 14
<i>In loco</i>	0.664	< .001	< .001	< .001

Fonte: o próprio autor

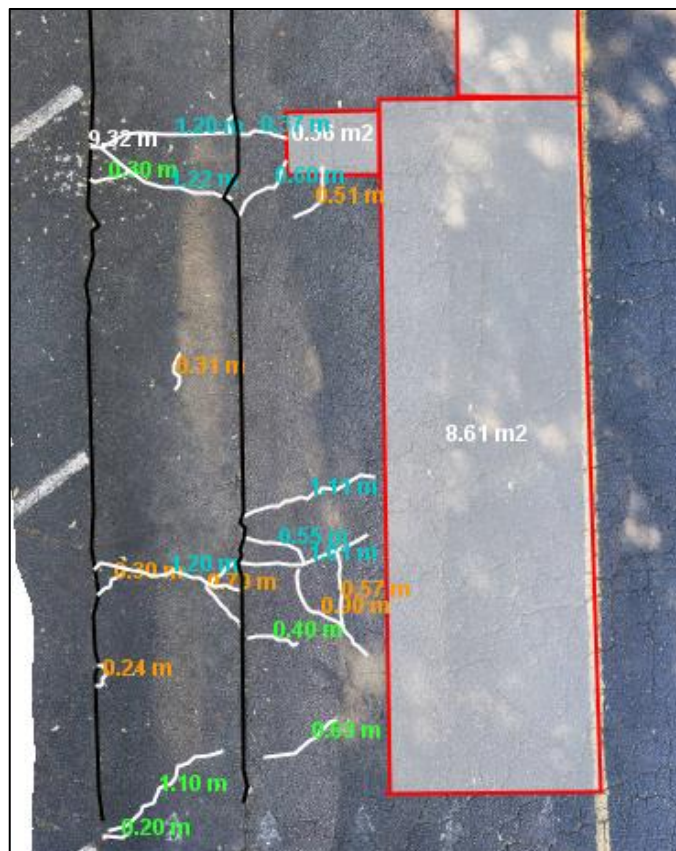
Os resultados indicam que, para o modelo 2, o p-valor foi de 0,664, maior que o nível de significância adotado (0,05). Isso significa que não há diferença estatisticamente significativa entre o modelo 2 e as medidas *in loco*. Por outro lado, os resultados dos outros modelos apresentaram p-valores menores que 0,001, o que indica que há uma diferença estatisticamente significativa entre as medições desses modelos e as medidas *in loco*.

Portanto, os modelos 8, 13 e 14 mostram diferenças significativas em relação às medições realizadas no campo, sugerindo que esses modelos podem não ser adequados para representar a condição real do pavimento. Em contrapartida, o modelo 2 pareceu ser o mais próximo das medidas *in loco*, já que não apresentou diferença estatisticamente significativa.

5.1.2 Análise Comparativa das Dimensões dos Defeitos – Fase II

O modelo 3D gerado e selecionado, tendo em vista o tópico anterior, foi inserido no *software iTwin Manage And Extract* para a identificação dos defeitos presentes na superfície do pavimento. Na Figura 5.2, apresenta-se esse modelo com as marcações dos defeitos, enquanto na Figura 5.3 pode ser observado um exemplo de anotação realizada nesse *software*.

Figura 5.2 – Modelo 3D com identificação de defeitos no *iTwin Manage And Extract*



Fonte: o próprio autor

Figura 5.3 – Exemplo de anotação dos defeitos no *software iTwin*



Fonte: o próprio autor

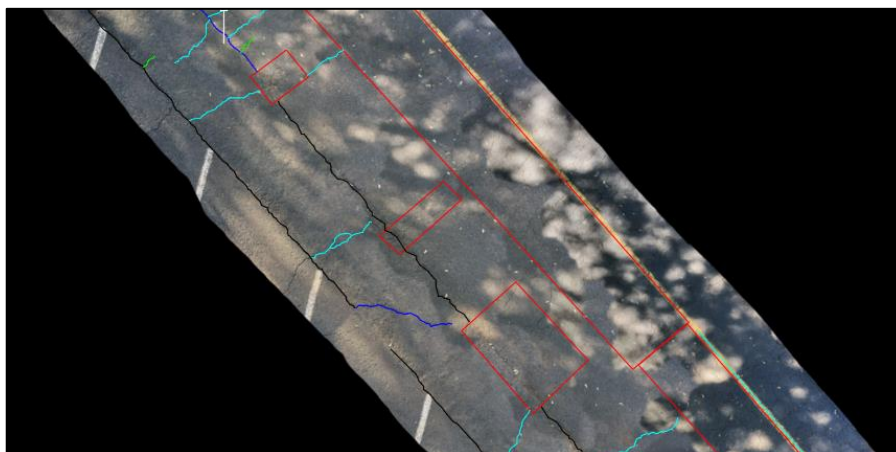
Em seguida, um ortomosaico foi gerado com as mesmas características do modelo 3D. Ela foi então importada para o AutoCAD, onde os defeitos também foram identificados e anotados, conforme ilustrado nas Figuras 5.4 e 5.5.

Figura 5.4 – Ortomosaico UA 144 no *software* AutoCAD



Fonte: o próprio autor

Figura 5.5 – Exemplo de anotação dos defeitos no *software* AutoCAD



Fonte: o próprio autor

O processamento das imagens revelou que, ao serem importadas para ambos os *softwares*, sua qualidade foi preservada, permitindo uma identificação clara e precisa dos defeitos para avaliação. Entretanto, algumas dificuldades foram observadas em regiões com presença de árvores, onde as sombras geraram interferências visuais, comprometendo parcialmente a identificação dos defeitos. Além disso, essas regiões no modelo 3D e no ortomosaico apresentaram trechos com menor nitidez ou partes embaçadas, o que pode ser atribuído à dificuldade em captar imagens nítidas e homogêneas nesses ambientes. Nas imagens da Figura 5.6 estão alguns trechos que ilustram essa questão.

Figura 5.6 – Sombras na representação do pavimento no ortomosaico



Fonte: o próprio autor

Dessa forma, os desafios observados em áreas com interferências visuais reforçam a importância de uma configuração adequada dos parâmetros de processamento para garantir a qualidade dos produtos fotogramétricos gerados.

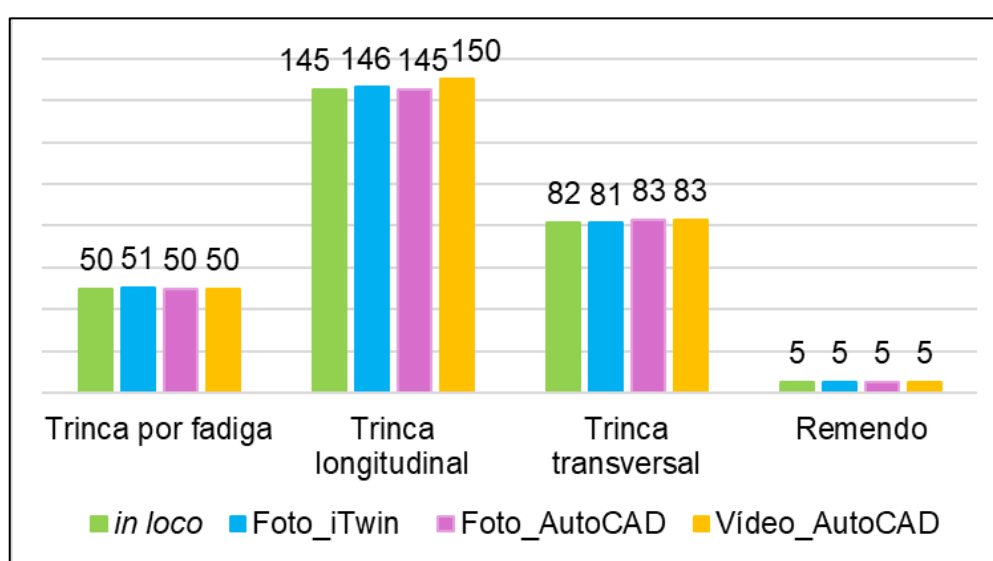
Para facilitar a visualização e interpretação dos dados resultantes da comparação feita entre os resultados relativos à identificação e mensuração dos defeitos, foi realizada uma padronização na nomenclatura. As medidas coletadas em campo foram representadas como *in loco*, enquanto as obtidas no *software iTwin* foram denominadas modelo 3D Foto_ *iTwin*, as do *software* AutoCAD como ortomosaico Foto_ AutoCAD e aquelas provenientes da coleta por vídeos como ortomosaico Vídeo_ AutoCAD.

Os defeitos encontrados incluíram trincas por fadiga, longitudinais e transversais, e remendos, com diferentes severidades: alta para trincas por fadiga, trincas longitudinais e remendos; média para trincas longitudinais e

transversais; e baixa para trincas longitudinais e transversais. No total, foram identificadas 177 medidas de defeitos *in loco*, todas elas identificadas no modelo 3D e ortomosaico.

Foi elaborado um gráfico de colunas agrupadas (Figura 5.7), representando o somatório da metragem de cada defeito localizado *in loco*, Foto_ iTwin, Foto_ AutoCAD e Vídeo_ AutoCAD.

Figura 5.7 – Somatório das dimensões dos defeitos para as medidas *in loco*, Foto_ iTwin, Foto_ AutoCAD e Vídeo_ AutoCAD na UA 144



Fonte: o próprio autor

Com essa representação gráfica, observou-se que a trinca longitudinal foi o defeito mais frequente, com uma leve variação de 1 metro no modelo Foto_ iTwin em relação ao *in loco*, enquanto Foto_ AutoCAD manteve-se estável. Já Vídeo_ AutoCAD apresentou um aumento de 5 metros em comparação ao *in loco*.

As trincas por fadiga mostraram uma variação semelhante, com Foto_ iTwin registrando um desvio de 1 metro em relação ao *in loco*, enquanto Foto_ AutoCAD e Vídeo_ AutoCAD permaneceram estáveis. Para as trincas transversais, o modelo Foto_ iTwin registrou uma redução de 1 metro em relação ao *in loco*, enquanto Foto_ AutoCAD e Vídeo_ AutoCAD apresentaram um aumento de 1 metro. No caso dos remendos, os valores foram idênticos em todas as condições avaliadas.

De modo geral, nos casos em que houve variação, o modelo Foto_ iTwin e o ortomosaico Vídeo_ AutoCAD apresentaram valores ligeiramente superiores ao *in*

loco. No entanto, a pequena diferença entre os métodos sugere que as técnicas de medição são confiáveis na identificação e mensuração dos defeitos.

Para aprofundar essa análise, comparou-se as diferenças entre os *softwares* de medição, onde foi avaliada a diferença entre os somatórios das extensões de cada defeito localizado em Foto_ iTwin e Foto_ AutoCAD com relação ao *in loco*, permitindo uma avaliação detalhada da relação dos procedimentos empregados, como exemplificado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Somatório das dimensões dos defeitos na UA 144: *softwares* de medição

Defeito	<i>In loco</i> - Foto_ iTwin		<i>In loco</i> - Foto_ AutoCAD	
	Diferença	Relação	Diferença	Relação
Trinca por fadiga (m ²)	0,8	1,5%	0,1	0,2%
Trinca longitudinal (m)	1,1	0,7%	0,1	0,1%
Trinca transversal (m)	0,4	0,5%	1,1	1,4%
Remendo (m ²)	0,1	1,3%	0,0	0,5%

Fonte: o próprio autor

A análise dos dados apresentados permite identificar algumas diferenças e relações entre os modelos 3D e ortomosaicos avaliados. A trinca por fadiga apresentou a maior variação entre *in loco* e Foto_ iTwin, com um aumento de 0,8 m², enquanto entre *in loco* e Foto_ AutoCAD a variação foi mínima, de apenas 0,1 m², representando 0,2% de diferença. Já para as trincas longitudinais, a variação foi pequena, com um leve aumento entre *in loco* e Foto_ iTwin e uma estabilidade entre *in loco* e Foto_ AutoCAD, com uma diferença de apenas 10 centímetros, sugerindo que esse defeito permaneceu praticamente inalterado entre as comparações.

A trinca transversal foi o defeito com a maior variação, especialmente entre *in loco* e Foto_ AutoCAD, onde a diferença foi de 1,1 metros, indicando uma possível maior deterioração nesse trecho do pavimento ou uma sensibilidade maior do método na captura desse tipo de falha. Quanto aos remendos, as

variações foram insignificantes, com 0,1 m² para Foto_ iTwin e nenhuma diferença significativa para Foto_ AutoCAD.

De forma geral, os resultados indicam que os modelos avaliados apresentaram pequenas variações, demonstrando a consistência das medições. A maior discrepância foi observada na trinca transversal entre *in loco* e Foto_ AutoCAD, sugerindo uma evolução da deterioração ou uma maior precisão do ortomosaico na detecção desse defeito. Assim, do ponto de vista desta análise inicial, conclui-se que os métodos Foto_ iTwin e Foto_ AutoCAD se mostraram eficazes na avaliação da condição do pavimento, fornecendo dados confiáveis para a identificação e quantificação dos danos.

Para completar a análise anterior, foi realizada a verificação da relação entre os valores dos diferentes modelos em relação a um mesmo defeito e severidade. Foi inicialmente realizado o teste de normalidade, como demonstrado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Teste à normalidade na UA 144: softwares de medição

	Relação	p-valor	Situação H ₀
<i>In loco</i> - Trinca por fadiga – Alta	- Foto_ iTwin - Trinca por fadiga - Alta	< ,001	Recusar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal – Alta	- Foto_ iTwin - Trinca longitudinal - Alta	< ,001	Recusar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal – Média	- Foto_ iTwin - Trinca longitudinal - Média	< ,001	Recusar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal – Baixa	- Foto_ iTwin - Trinca longitudinal - Baixa	< ,001	Recusar
<i>In loco</i> - Trinca transversal – Média	- Foto_ iTwin - Trinca transversal - Média	0,001	Recusar
<i>In loco</i> - Trinca transversal – Baixa	- Foto_ iTwin - Trinca transversal - Baixa	< ,001	Recusar
<i>In loco</i> - Remendo – Alta	- Foto_ iTwin - Remendo - Alta	0,78	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca por fadiga – Alta	- Foto_ AutoCAD - Trinca por fadiga - Alta	< ,001	Recusar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal – Alta	- Foto_ AutoCAD - Trinca longitudinal - Alta	0,282	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal – Média	- Foto_ AutoCAD - Trinca longitudinal - Média	< ,001	Recusar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal – Baixa	- Foto_ AutoCAD - Trinca longitudinal - Baixa	< ,001	Recusar
<i>In loco</i> - Trinca transversal – Média	- Foto_ AutoCAD - Trinca transversal - Média	< ,001	Recusar
<i>In loco</i> - Trinca transversal – Baixa	- Foto_ AutoCAD - Trinca transversal - Baixa	< ,001	Recusar
<i>In loco</i> - Remendo – Alta	- Foto_ AutoCAD - Remendo - Alta	0,209	Aceitar
Foto_ iTwin - Trinca por fadiga – Alta	- Foto_ AutoCAD - Trinca por fadiga - Alta	< ,001	Recusar
Foto_ iTwin - Trinca longitudinal – Alta	- Foto_ AutoCAD - Trinca longitudinal - Alta	0,003	Recusar
Foto_ iTwin - Trinca longitudinal – Média	- Foto_ AutoCAD - Trinca longitudinal - Média	0,698	Aceitar
Foto_ iTwin - Trinca longitudinal – Baixa	- Foto_ AutoCAD - Trinca longitudinal - Baixa	< ,001	Recusar
Foto_ iTwin - Trinca transversal – Média	- Foto_ AutoCAD - Trinca transversal - Média	0,005	Recusar
Foto_ iTwin - Trinca transversal – Baixa	- Foto_ AutoCAD - Trinca transversal - Baixa	< ,001	Recusar
Foto_ iTwin - Remendo – Alta	- Foto_ AutoCAD - Remendo - Alta	0,927	Aceitar

Fonte: o próprio autor

Os resultados indicaram que, na comparação entre *in loco* e Foto_ iTwin, o defeito de trinca apresentou um p-valor de 0,001, inferior ao nível de significância adotado (0,05), sugerindo que os dados não seguem distribuição normal. Em contrapartida, o defeito de remendo obteve p-valor de 0,78, o que indica uma distribuição normal. De forma semelhante, na comparação entre *in loco* e Foto_AutoCAD, as trincas longitudinais com severidade alta e os remendos resultaram em p-valores $> \alpha$, enquanto os demais defeitos apresentaram p-valor $< \alpha$.

Com base nesses resultados, foram aplicados testes estatísticos adequados a cada caso: o teste de Friedman e o teste t Pareado. Os resultados desses testes estão apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Análise estatística na UA 144: softwares de medição

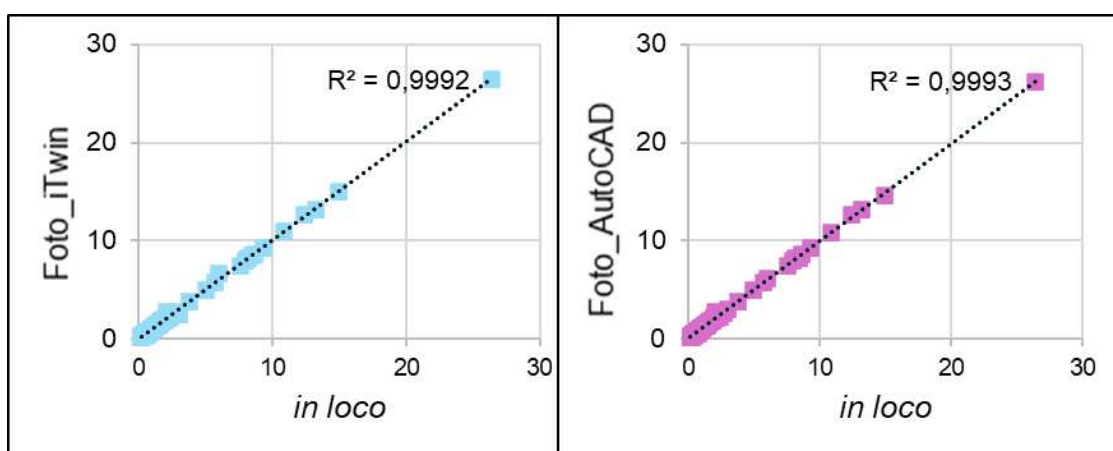
	Relação	p-valor	Situação H_0
<i>In loco</i> - Trinca por fadiga – Alta	- Foto_ iTwin - Trinca por fadiga - Alta	0,23	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal – Alta	- Foto_ iTwin - Trinca longitudinal - Alta	0,06	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal – Média	- Foto_ iTwin - Trinca longitudinal - Média	0,10	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal – Baixa	- Foto_ iTwin - Trinca longitudinal - Baixa	0,31	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca transversal – Média	- Foto_ iTwin - Trinca transversal - Média	0,65	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca transversal – Baixa	- Foto_ iTwin - Trinca transversal - Baixa	0,50	Aceitar
<i>In loco</i> - Remendo – Alta	- Foto_ iTwin - Remendo - Alta	0,25	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca por fadiga – Alta	- Foto_AutoCAD - Trinca por fadiga - Alta	0,53	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal – Alta	- Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Alta	0,73	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal – Média	- Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Média	0,13	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal – Baixa	- Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Baixa	0,41	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca transversal – Média	- Foto_AutoCAD - Trinca transversal - Média	0,82	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca transversal – Baixa	- Foto_AutoCAD - Trinca transversal - Baixa	0,54	Aceitar
<i>In loco</i> - Remendo – Alta	- Foto_AutoCAD - Remendo - Alta	0,58	Aceitar
Foto_ iTwin - Trinca por fadiga – Alta	- Foto_AutoCAD - Trinca por fadiga - Alta	0,27	Aceitar
Foto_ iTwin - Trinca longitudinal – Alta	- Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Alta	0,11	Aceitar
Foto_ iTwin - Trinca longitudinal – Média	- Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Média	0,46	Aceitar
Foto_ iTwin - Trinca longitudinal – Baixa	- Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Baixa	0,62	Aceitar
Foto_ iTwin - Trinca transversal – Média	- Foto_AutoCAD - Trinca transversal - Média	0,82	Aceitar
Foto_ iTwin - Trinca transversal – Baixa	- Foto_AutoCAD - Trinca transversal - Baixa	0,19	Aceitar
Foto_ iTwin - Remendo – Alta	- Foto_AutoCAD - Remendo - Alta	0,08	Aceitar

Fonte: o próprio autor

A análise estatística demonstrou que os valores obtidos para os diferentes métodos apresentaram semelhanças significativas, visto que todos os p-valores foram superiores ao nível de significância adotado (5%). Isso sugere que as características dos defeitos, em termos de dimensões e severidade, foram capturadas de maneira semelhante pelos diferentes modelos testados.

Para complementar a análise, foi realizada correlação entre as extensões extraídas pelos *softwares* e os valores obtidos em campo (*in loco*). Os resultados foram sintetizados graficamente na Figura 5.8.

Figura 5.8 – Gráficos de correlação na UA 144: *softwares* de medição



Fonte: o próprio autor

Como pode ser observado, existe uma correlação quase perfeita entre os conjuntos de dados, com coeficiente de correlação (r) próximo de 1 ($r = 0,999$). Valores de coeficiente acima de 0,8 representam uma forte correlação, indicando que as medições obtidas pelos modelos digitais estão altamente alinhadas com as medições realizadas *in loco*.

A linha de tendência reforça o alinhamento dos dados entre *in loco* com Foto_iTwin e *in loco* com Foto_AutoCAD. Além disso, o diagrama de dispersão indica que 99,9% da variação das medições de Foto_iTwin e Foto_AutoCAD é explicada pela reta de regressão, enquanto apenas 0,1% não é explicado.

Os resultados obtidos indicam que ambos os *softwares* utilizados para extrair os dados dos modelos gerados (Foto_iTwin e Foto_AutoCAD) não introduzem influências negativas na análise dos defeitos, quando comparados com os dados coletados diretamente no campo. As diferenças observadas entre os

procedimentos foram pequenas e, na maioria dos casos, estatisticamente insignificantes.

Na unidade piloto analisada, os dois *softwares* testados demonstraram grande potencial para a avaliação da condição da superfície de pavimentos flexíveis urbanos e reforçam a confiabilidade dos procedimentos. Entretanto, ao comparar a funcionalidade dos dois, constatou-se que a plataforma *iTwin* apresenta limitações na manipulação dos dados, como a impossibilidade de sobreposição de *layers* e seleção simultânea de múltiplas camadas, tornando o processo mais lento. Em contrapartida, o AutoCAD permite a seleção das *layers* simultaneamente e a obtenção rápida do somatório de polilinhas, demonstrando ser mais prático e dinâmico para a gestão das informações.

Diante dessas considerações, optou-se por utilizar o *software* AutoCAD na continuidade das análises, dada sua maior facilidade de uso e eficiência na extração e manipulação dos dados. Com isso, seguiu-se para a análise comparativa das dimensões dos defeitos entre os métodos de aquisição de imagens.

Foi elaborada uma tabela para comparar o somatório das extensões de cada defeito, sem considerar a severidade, entre os dados obtidos pelo procedimento de foto (Foto_AutoCAD) e por vídeos (Vídeo_AutoCAD), conforme identificado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Somatório das dimensões dos defeitos na UA 144: aquisição de imagens

Defeito	<i>in loco</i>	Foto_AutoCAD	Vídeo_AutoCAD	Diferença	Relação
Trinca por fadiga	49,8	49,7	50,0	0,3	0,5%
Trinca longitudinal	145,1	145,2	149,6	4,5	3,1%
Trinca transversal	81,7	82,8	82,8	1,1	1,3%
Remendo	5,3	5,3	5,4	0,1	2,0%

Fonte: o próprio autor

Foi possível observar que o defeito mais recorrente identificado foi o de trinca longitudinal, que apresentou a maior diferença entre os ortomosaicos, com variação de 4,5 metros. Em contraste, o defeito remendo foi o menos recorrente, com uma diferença de apenas 0,1 metros, sendo também o que apresentou a

menor variação. Além disso, foi observado que, em geral, o ortomosaico Vídeo_AutoCAD apresentou valores ligeiramente superiores ao modelo de referência (*in loco*), sugerindo uma tendência de superestimação. Apesar disso, as relações percentuais entre os ortomosaicos indicaram boa consistência, com variações abaixo de 3,5%, sendo a maior discrepância observada na trinca longitudinal. A análise *in loco* com Foto_AutoCAD já foi feita anteriormente.

Com base nessas análises iniciais, o método Vídeo_AutoCAD apresentou boa consistência com as dimensões *in loco*. Para confirmar a consistência dos resultados, seguiu-se com a aplicação dos testes de hipóteses para avaliar detalhadamente a relação entre as medições dos defeitos nos diferentes métodos de aquisição de imagens.

Inicialmente, foi realizado o teste de normalidade, cujos resultados estão apresentados na Tabela 5.9. Esse teste é fundamental para determinar a adequação de diferentes abordagens estatísticas para os dados coletados.

Tabela 5.9 – Teste à normalidade na UA 144: aquisição de imagens

	Relação	p-valor	Situação H ₀
<i>In loco</i> - Trinca por fadiga – Alta	- Foto_AutoCAD - Trinca por fadiga - Alta	<,001	Recusar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal – Alta	- Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Alta	0,282	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal – Média	- Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Média	<,001	Recusar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal – Baixa	- Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Baixa	<,001	Recusar
<i>In loco</i> - Trinca transversal – Média	- Foto_AutoCAD - Trinca transversal - Média	<,001	Recusar
<i>In loco</i> - Trinca transversal – Baixa	- Foto_AutoCAD - Trinca transversal - Baixa	<,001	Recusar
<i>In loco</i> - Remendo – Alta	- Foto_AutoCAD - Remendo - Alta	0,209	Aceitar
<i>In loco</i> - Remendo – Alta	- Vídeo_AutoCAD - Remendo - Alta	0,637	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal - Alta	- Vídeo_AutoCAD - Trinca longitudinal - Alta	0,007	Recusar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal - Baixa	- Vídeo_AutoCAD - Trinca longitudinal - Baixa	<,001	Recusar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal - Média	- Vídeo_AutoCAD - Trinca longitudinal - Média	<,001	Recusar
<i>In loco</i> - Trinca por fadiga - Alta	- Vídeo_AutoCAD - Trinca por fadiga - Alta	0,011	Recusar
<i>In loco</i> - Trinca transversal - Baixa	- Vídeo_AutoCAD - Trinca transversal - Baixa	0,074	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca transversal - Média	- Vídeo_AutoCAD - Trinca transversal - Média	0,011	Recusar
Foto_AutoCAD - Remendo – Alta	- Vídeo_AutoCAD - Remendo - Alta	0,298	Aceitar
Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Alta	- Vídeo_AutoCAD - Trinca longitudinal - Alta	0,003	Recusar
Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Baixa	- Vídeo_AutoCAD - Trinca longitudinal - Baixa	<,001	Recusar
Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Média	- Vídeo_AutoCAD - Trinca longitudinal - Média	<,001	Recusar
Foto_AutoCAD - Trinca por fadiga - Alta	- Vídeo_AutoCAD - Trinca por fadiga - Alta	<,001	Recusar
Foto_AutoCAD - Trinca transversal - Baixa	- Vídeo_AutoCAD - Trinca transversal - Baixa	0,071	Aceitar
Foto_AutoCAD - Trinca transversal - Média	- Vídeo_AutoCAD - Trinca transversal - Média	0,004	Recusar

Fonte: o próprio autor

Na comparação *in loco* x Foto_AutoCAD, o defeito de trinca longitudinal com severidade alta e o defeito remendo resultaram em p-valores $> \alpha$, diferente dos outros defeitos que foram calculados como p-valor $< \alpha$. Foi observado que na comparação entre *in loco* com Vídeo_AutoCAD e Vídeo_AutoCAD com Foto_AutoCAD, o defeito de trinca transversal de severidade baixa e o defeito remendo resultaram em p-valor maior que o nível de significância adotado (0,05). Em contraste, os defeitos de trincas apresentaram p-valor menor que 0,05.

Com base nessas observações, foi realizado o teste de Friedman e o teste t Pareado. Os resultados dos testes são apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Análise estatística na UA 144: aquisição de imagens

	Relação	p-valor	Situação H_0
<i>In loco</i> - Trinca por fadiga – Alta	- Foto_AutoCAD - Trinca por fadiga - Alta	0,53	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal – Alta	- Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Alta	0,725	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal – Média	- Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Média	0,127	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal – Baixa	- Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Baixa	0,407	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca transversal – Média	- Foto_AutoCAD - Trinca transversal - Média	0,822	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca transversal – Baixa	- Foto_AutoCAD - Trinca transversal - Baixa	0,271	Aceitar
<i>In loco</i> - Remendo – Alta	- Foto_AutoCAD - Remendo - Alta	0,58	Aceitar
<i>In loco</i> - Remendo – Alta	- Vídeo_AutoCAD - Remendo - Alta	0,199	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal - Alta	- Vídeo_AutoCAD - Trinca longitudinal - Alta	0,022	Recusar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal - Baixa	- Vídeo_AutoCAD - Trinca longitudinal - Baixa	0,523	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal - Média	- Vídeo_AutoCAD - Trinca longitudinal - Média	0,012	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca por fadiga - Alta	- Vídeo_AutoCAD - Trinca por fadiga - Alta	0,014	Recusar
<i>In loco</i> - Trinca transversal - Baixa	- Vídeo_AutoCAD - Trinca transversal - Baixa	0,284	Aceitar
<i>In loco</i> - Trinca transversal - Média	- Vídeo_AutoCAD - Trinca transversal - Média	0,002	Recusar
Foto_AutoCAD - Remendo – Alta	- Vídeo_AutoCAD - Remendo - Alta	0,336	Aceitar
Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Alta	- Vídeo_AutoCAD - Trinca longitudinal - Alta	0,025	Recusar
Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Baixa	- Vídeo_AutoCAD - Trinca longitudinal - Baixa	0,054	Aceitar
Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Média	- Vídeo_AutoCAD - Trinca longitudinal - Média	0,027	Aceitar
Foto_AutoCAD - Trinca por fadiga - Alta	- Vídeo_AutoCAD - Trinca por fadiga - Alta	0,262	Aceitar
Foto_AutoCAD - Trinca transversal - Baixa	- Vídeo_AutoCAD - Trinca transversal - Baixa	0,02	Aceitar
Foto_AutoCAD - Trinca transversal - Média	- Vídeo_AutoCAD - Trinca transversal - Média	<0,001	Recusar

Fonte: o próprio autor

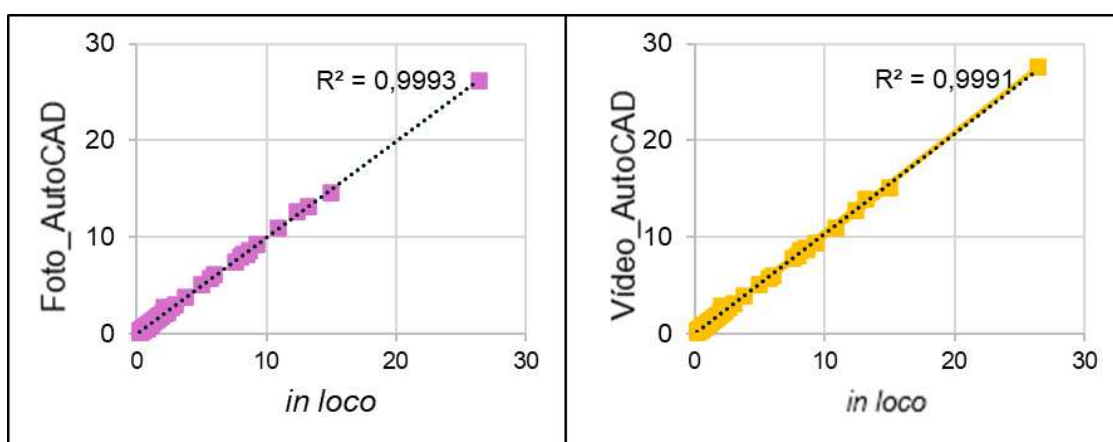
Analisando os dados que rejeitaram a hipótese nula, demonstrou-se que existe diferença significativa entre os dois grupos. Foram observadas as médias e medianas dessas comparações, como detalhado na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Estatística descritiva na UA 144: aquisição de imagens

Defeito	N	Média	Mediana
<i>In loco</i> - Trinca longitudinal - Alta	8	10.44	8.350
Vídeo_AutoCAD - Trinca longitudinal - Alta	8	10.74	8.715
Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Alta	8	10.42	8.210
<i>In loco</i> - Trinca por fadiga - Alta	14	3.56	1.330
Vídeo_AutoCAD - Trinca por fadiga - Alta	14	3.58	1.360
Foto_AutoCAD - Trinca longitudinal - Alta	8	10.42	8.210
<i>In loco</i> - Trinca transversal - Média	60	1.03	0.950
Vídeo_AutoCAD - Trinca transversal - Média	60	1.05	1.015

Fonte: o próprio autor

Os resultados mostram que Vídeo_AutoCAD apresentou os maiores valores de média e mediana para os defeitos de trinca longitudinal e fadiga, com severidade alta, e para trinca transversal, com severidade média. Em contraste, o ortomosaico Foto_AutoCAD apresentou os menores valores para esses mesmos defeitos. Por fim, foi realizada a correlação entre as medidas obtidas pelos métodos de aquisição de imagens (Foto_AutoCAD e Vídeo_AutoCAD) e os dados coletados *in loco*, identificados na Figura 5.9.

Figura 5.9 – Gráficos de correlação na UA 144: aquisição de imagens

Fonte: o próprio autor

Os gráficos de correlação mostram que existe uma correlação quase perfeita entre os conjuntos de dados, com $r = 0,999$, indicando que as medições realizadas com os diferentes métodos de aquisição estão fortemente alinhadas. A linha de tendência reforça o alinhamento dos dados entre *in loco* com Foto_AutoCAD e *in loco* com Vídeo_AutoCAD. Além disso, o diagrama de dispersão indica que 99,9% da variação das medições de Foto_AutoCAD e Vídeo_AutoCAD foi explicada pela reta de regressão, enquanto apenas 0,1% não foi explicado.

Com tudo, na unidade piloto (UA 144), os resultados obtidos indicam que, em ambos os procedimentos para aquisição de imagens, os dados dos modelos gerados não introduzem influências negativas na análise dos defeitos, quando comparados com os dados coletados diretamente em campo.

No entanto, ao comparar o tempo de execução dos procedimentos, observou-se que a coleta por fotos levou cerca de 4 horas, enquanto a coleta por vídeo foi concluída em apenas 2 horas. Considerando essa diferença significativa de tempo, optou-se por seguir com a coleta por vídeo para as análises subsequentes, uma vez que esse método foi mais rápido e eficiente.

No próximo tópico, será apresentada a validação do procedimento de pesquisa, destacando as decisões tomadas, como a escolha do AutoCAD para obtenção dos dados e o uso de vídeos como procedimento de aquisição de imagens. Essas definições adotadas na unidade piloto serão aplicadas às demais unidades do estudo.

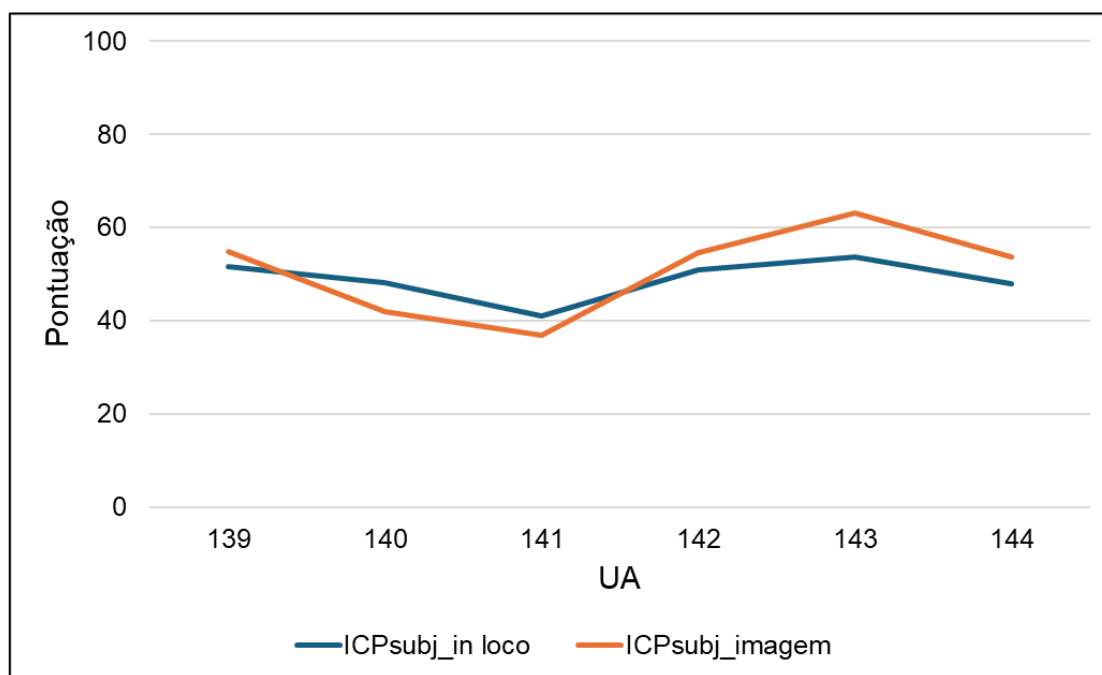
5.2 VALIDAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE PESQUISA

Após o período relativo ao teste piloto para a identificação, obtenção dos valores referentes às medidas dos defeitos e demais análises importantes para definir os parâmetros, foi realizada a última fase da pesquisa. A referida fase foi relativa à validação do método para avaliação de pavimentos com emprego de *smartphone* e da técnica de fotogrametria de curto alcance. Assim, na Fase III, foram levantadas todas as informações necessárias para determinar os índices de condição do pavimento (ICPsubj e PCI) de todas as UAs pertencentes aos trechos B e C da rede viária do campus e realizada a análise comparativa dos resultados entre os diferentes procedimentos adotados.

5.2.1 Análise da Avaliação Subjetiva da Condição do Pavimento

A primeira etapa da análise consistiu na avaliação subjetiva das condições do pavimento, para a qual foram selecionadas seis unidades de análise pertencentes ao trecho C. A Figura 5.10 apresenta a comparação entre as médias das pontuações das UAs obtidas por meio das duas abordagens.

Figura 5.10 – Comparação gráfica entre ICPsubj_*in loco* e ICPsubj_*imagem* no trecho C



Fonte: o próprio autor

Pode-se observar que os resultados indicam que a avaliação subjetiva apresentou pontuações semelhantes em ambas as abordagens ao longo das UAs. Com exceção da UA 141, todas as demais foram avaliadas com pontuação acima de 40 pontos, demonstrando uma relativa consistência na percepção das condições do pavimento.

Em quatro UAs, a pontuação obtida do ICPsubj_*imagem* foi ligeiramente superior à pontuação atribuída ao ICPsubj_*in loco*, enquanto na UA 140 e UA 141, o ICPsubj_*in loco* apresentou valores maiores. A maior diferença encontrada ocorreu na UA 143, com um desvio de 9,4 pontos.

A atribuição de pontuações maiores na avaliação por imagem, indicando que a UA está em melhor condição, pode estar relacionada à perda de detalhes devido à qualidade dos ortomosaicos, possivelmente afetados pela baixa resolução ou sombras na visualização. Por outro lado, menores pontuações identificadas *in loco* podem estar associadas à transferência da percepção de desconforto durante a avaliação em campo, influenciada pela exposição ao calor ou pelo cansaço físico.

O teste de correlação de Pearson revelou um coeficiente $r = 0,899$ e um p-valor de 0,015. O coeficiente de 0,899 indica uma correlação forte e positiva entre os dois métodos avaliativos. Ademais, o p-valor inferior a 0,05 sugere que essa correlação é estatisticamente significativa, ou seja, há uma forte associação linear entre as pontuações atribuídas por ambos os procedimentos.

Com relação à verificação da normalidade dos dados, os testes indicaram p-valores de 0,407 para o ICPsubj_*in loco* e 0,479 para o ICPsubj_*imagem*. Como esses valores são superiores ao nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), concluiu-se que os dados seguem uma distribuição normal. Diante disso, foi aplicado o teste t para amostras emparelhadas, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.12.

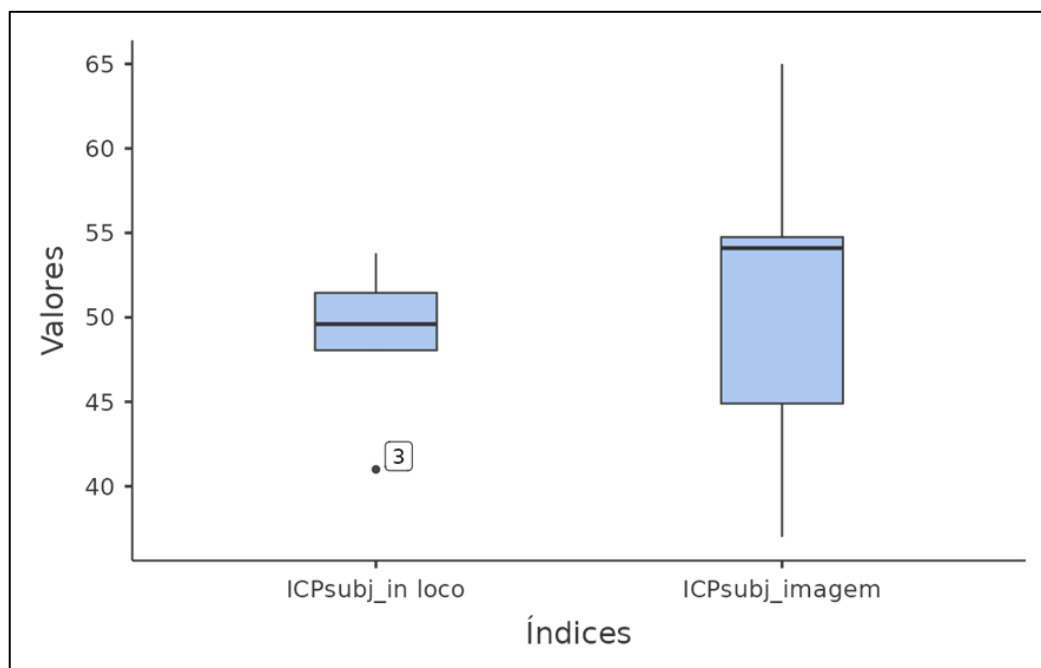
Tabela 5.12 – Teste t Pareado para ICPsubj_*in loco* e ICPsubj_*imagem* no trecho C

Informação	Resultado
<i>t</i> de Student	-0,801
p-valor	0,46

Fonte: o próprio autor

O valor negativo de t (-0,801) sugere que a média do ICPsubj_*in loco* é ligeiramente inferior à média do ICPsubj_*imagem*. Entretanto, o p-valor obtido (0,460) é superior ao nível de significância ($\alpha = 0,05$), indicando que essa diferença não é estatisticamente significativa. Assim, as duas abordagens podem ser consideradas equivalentes do ponto de vista estatístico. Por fim, foi realizada a análise dos boxplots, como mostra a Figura 5.11.

Figura 5.11 – Boxplot do ICPsubj_*in loco* e do ICPsubj_*imagem* no trecho C



Fonte: o próprio autor

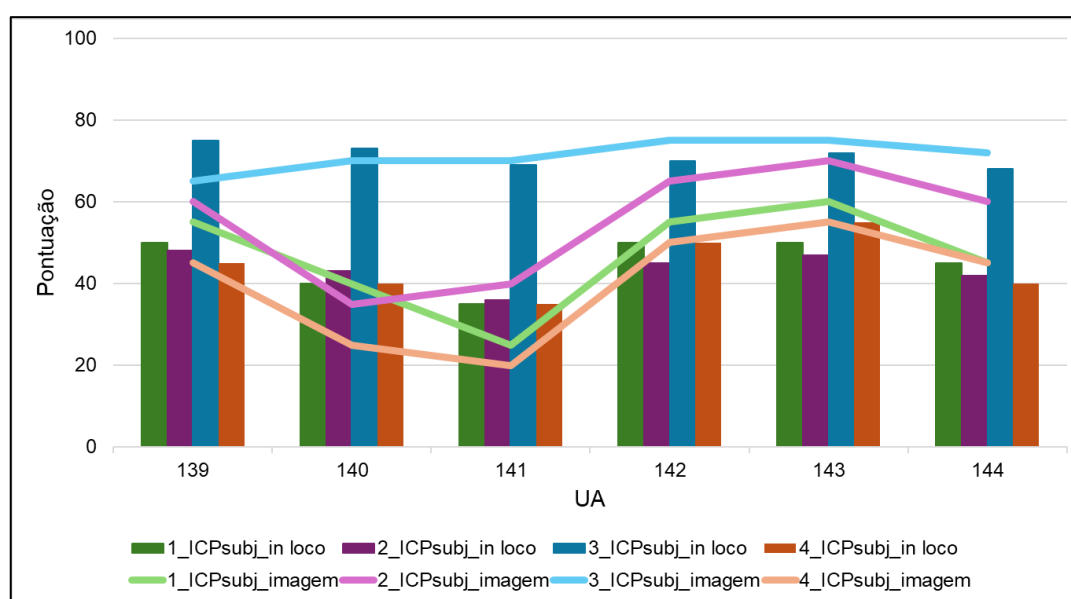
Observa-se que, para o índice ICPsubj_*in loco*, a mediana está próxima de 50, com um intervalo interquartil reduzido, sugerindo baixa variabilidade nos dados. Assim como, observa-se um outlier abaixo de 45, identificado como 3, sugerindo que pelo menos uma avaliação é significativamente menor do que a maioria dos dados. Em contrapartida, o índice ICPsubj_*imagem* apresenta uma mediana ligeiramente superior à do ICPsubj_*in loco*, com maior dispersão dos dados, refletida pelo aumento do intervalo interquartil. A amplitude total das pontuações na análise por imagem varia de um mínimo próximo de 40 a um máximo acima de 60.

Assim, o ICPsubj_*in loco* apresenta menor variabilidade nas pontuações, sugerindo maior consistência nas avaliações. O ICPsubj_*imagem* tem uma dispersão maior, o que pode indicar maior sensibilidade a diferentes fatores (qualidade da imagem, iluminação, *software* de processamento etc.). Em todas as análises, percebe-se que a diferença entre os resultados dos procedimentos não é significativa, sugerindo que ambos os índices podem gerar resultados semelhantes.

Ainda com os resultados da avaliação subjetiva, foi possível verificar a relação entre as notas atribuídas pelos diferentes avaliadores nos dois índices.

Para essa análise, foram utilizadas as pontuações de quatro participantes que participaram de ambos os procedimentos. Inicialmente, foi produzido um gráfico combinado, no qual as colunas agrupadas representam as notas atribuídas pelos avaliadores no ICPsubj_*in loco*, enquanto as linhas representam o ICPsubj_*imagem*. Essa representação pode ser observada na Figura 5.12.

Figura 5.12 – Comparação gráfica para os avaliadores da avaliação subjetiva no trecho C



Fonte: o próprio autor

Observa-se que as pontuações no ICPsubj_*imagem* (linhas) são geralmente mais altas do que no ICPsubj_*in loco* (colunas). Na UA 139, há uma leve diferença entre os dois índices, com pontuações mais próximas entre os avaliadores. Já na UA 140, ocorre uma queda nas notas do ICPsubj_*imagem*, indicando maior discrepância na percepção dos avaliadores ao analisarem os ortomosaicos. A partir da UA 141, as pontuações do ICPsubj_*imagem* começam a se estabilizar, mantendo uma tendência crescente até a UA 144.

O avaliador 3 apresenta a maior discrepância entre os dois índices, atribuindo notas mais elevadas no ICPsubj_*imagem*, enquanto os avaliadores 1, 2 e 4 mantêm um padrão mais equilibrado, com variações menores entre os dois índices. Assim, o gráfico demonstra que, embora existam diferenças nas notas atribuídas entre ICPsubj_*in loco* e ICPsubj_*imagem*, a tendência geral entre os

avaliadores é semelhante. Essa análise reforça a viabilidade da utilização de ortomosaicos para a avaliação subjetiva da condição do pavimento, desde que considere a variação entre os avaliadores e a possível influência do meio de análise.

Seguindo com as análises, foi realizada a verificação da normalidade dos dados por meio do teste de normalidade cujos resultados estão apresentados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Teste de normalidade para os avaliadores da avaliação subjetiva no trecho C

Avaliador	W de Shapiro-Wilk	p-valor de Shapiro-Wilk
1	0,955	0,704
2	0,913	0,230
3	0,934	0,419
4	0,911	0,217

Fonte: o próprio autor

Os resultados indicam que, para todos os avaliadores, os valores de p foram superiores a 0,05, sugerindo que as amostras seguem uma distribuição normal. Dessa forma, foi possível aplicar o teste t para amostras emparelhadas a fim de avaliar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os valores. Os resultados desse teste são apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Teste t Pareado para os avaliadores da avaliação subjetiva no trecho C

	Relação	Estatística	p-valor
1_ ICPsubj_ <i>in loco</i>	1_ ICPsubj_ imagem	-0.598	0.576
2_ ICPsubj_ <i>in loco</i>	2_ ICPsubj_ imagem	-2.409	0.061
3_ ICPsubj_ <i>in loco</i>	3_ ICPsubj_ imagem	0.000	1.000
4_ ICPsubj_ <i>in loco</i>	4_ ICPsubj_ imagem	1.185	0.289

Fonte: o próprio autor

Os valores de p obtidos apontam que não há diferenças estatisticamente significativas entre ICPsubj_*in loco* e ICPsubj_*imagem*, reforçando a viabilidade da metodologia adotada. Além disso, foi realizado o teste de correlação de Pearson para avaliar a relação entre os dois métodos. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Teste de correlação para os avaliadores da avaliação subjetiva no trecho C

Relação		r	p
1_ ICPsubj_ <i>in loco</i>	1_ ICPsubj_ <i>imagem</i>	0.980	<.001
2_ ICPsubj_ <i>in loco</i>	2_ ICPsubj_ <i>imagem</i>	0.670	0.145
3_ ICPsubj_ <i>in loco</i>	3_ ICPsubj_ <i>imagem</i>	-0.547	0.261
4_ ICPsubj_ <i>in loco</i>	4_ ICPsubj_ <i>imagem</i>	0.865	0.026

Fonte: o próprio autor

Os resultados sugerem que o avaliador 1 obteve uma correlação perfeita e positiva ($r = 0,980$, $p < 0,001$), indicando alta consistência entre os índices. O avaliador 2 apresentou uma correlação moderada e positiva ($r = 0,670$, $p = 0,145$), mas sem significância estatística, sugerindo uma tendência de relação, mas sem forte evidência estatística.

Já o avaliador 3 obteve uma correlação moderada e negativa ($r = -0,547$, $p = 0,261$), indicando uma tendência inversa entre os métodos, mas sem significância estatística. Por fim, o avaliador 4 apresentou uma correlação forte e positiva ($r = 0,865$, $p = 0,026$), estatisticamente significativa, sugerindo boa concordância entre ICPsubj_*in loco* e ICPsubj_*imagem*.

Esses resultados indicam que a confiabilidade da avaliação por imagem varia entre os avaliadores. Enquanto os avaliadores 1 e 4 demonstram alta concordância entre os índices, os avaliadores 2 e 3 apresentam correlações mais fracas ou inconsistentes, o que pode estar relacionado a diferenças na interpretação dos critérios ou na qualidade das imagens utilizadas.

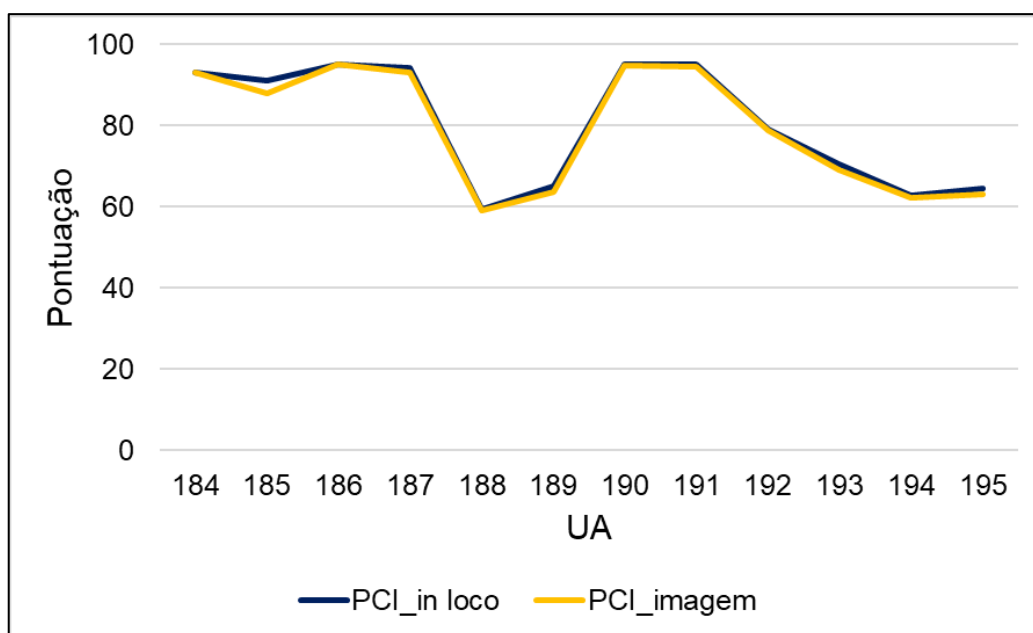
Contudo, a diferença entre os índices, por conta das variações individuais dos avaliadores, pode indicar que a análise de ortomosaicos leva a uma percepção diferente do estado do pavimento, possivelmente devido à resolução das imagens ou à falta de informações tridimensionais.

No entanto, considerando todas as análises, a consistência nas avaliações sugere que os dois índices podem ser considerados equivalentes, pois ambos fornecem resultados confiáveis. Com a conclusão das análises da avaliação subjetiva, iniciaram-se as análises da avaliação objetiva.

5.2.2 Análise da Avaliação Objetiva da Condição do Pavimento

Esta etapa foi realizada em 18 UAs localizadas nos trechos B e C, comparando os resultados do índice de condição do pavimento sob duas abordagens: PCI_*in loco* com PCI_imagem. Para essa comparação, foi elaborada uma representação gráfica, como pode ser observado nas Figuras 5.13 e 5.14, ilustrando a avaliação objetiva, evidenciando o resultado do PCI para cada unidade amostral.

Figura 5.13 – Comparação gráfica entre PCI_*in loco* e PCI_imagem no trecho B



Fonte: o próprio autor

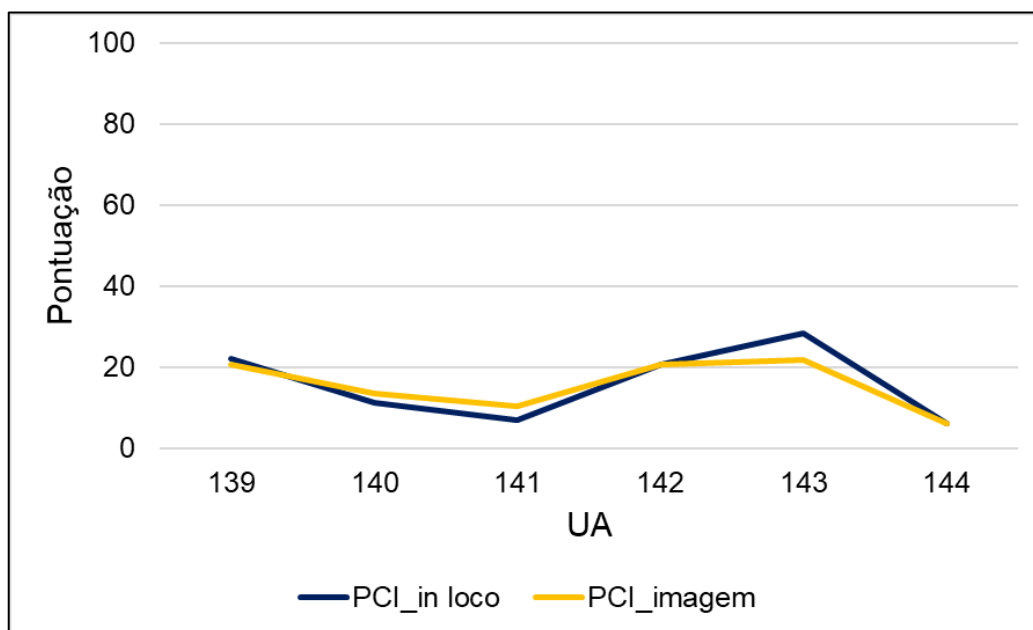
Para os resultados das UAs no trecho B, as pontuações foram substancialmente mais altas, com valores superiores a 55 pontos, chegando até perto de 100 pontos em algumas UAs. As duas abordagens utilizadas (PCI_*in loco*

e PCI_imagem) seguiram padrões muito semelhantes, dificultando a visualização de diferenças entre elas.

No entanto, algumas pequenas discrepâncias foram observadas. A maior diferença ocorreu na UA 185, com uma variação de 3 pontos. Percebe-se que as linhas definidas no gráfico ficaram muito próximas, o PCI_in loco apresentou pontuações maiores em 11 UAs.

A atribuição de pontuações menores na avaliação por imagem, indicando que a UA está em pior condição, pode estar relacionada ao conforto de realizar uma análise em ambiente controlado, permitindo uma identificação mais precisa dos defeitos. Por outro lado, maiores pontuações identificadas *in loco* podem estar associadas ao desconforto durante a avaliação em campo, influenciado pela exposição ao calor ou cansaço físico, o que pode resultar na identificação de menos ocorrências de defeitos.

Figura 5.14 – Comparação gráfica entre PCI_in loco e PCI_imagem no trecho C



Fonte: o próprio autor

Nos resultados das UAs no trecho C, as pontuações obtidas foram valores mais baixos, variando de 0 a 40 pontos. A maior discrepância foi observada na UA 143, com uma diferença de 7 pontos. O PCI_in loco foi superior em 3 UAs, assim como em 3 UAs, o PCI_imagem obteve pontuação maior.

Em ambos os trechos, a variação das diferenças não ultrapassou 8 pontos, o que é considerado relativamente baixo. Muitas UAs são apresentadas próximas entre as duas abordagens. No geral, o PCI_*in loco* obteve pontuação maior que o PCI_*imagem* na maioria das UAs.

Feito isso, seguiu-se para a análise da normalidade dos dados, os testes realizados indicaram p-valores de 0,011 para PCI_*in loco* e 0,010 para a PCI_*imagem*. Como esses valores são inferiores ao nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), conclui-se que os dados não seguem uma distribuição normal. Diante disso, foi aplicado o teste de Friedman para amostras pareadas, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 – Teste de Friedman para PCI_*in loco* e PCI_*imagem* no trecho B e C

Informação	Resultado
W de Friedman	106 ^a
p-valor	0.052
Diferença média	0.802
Erro-padrão da Diferença	0.492
Dimensão do Efeito	0.559

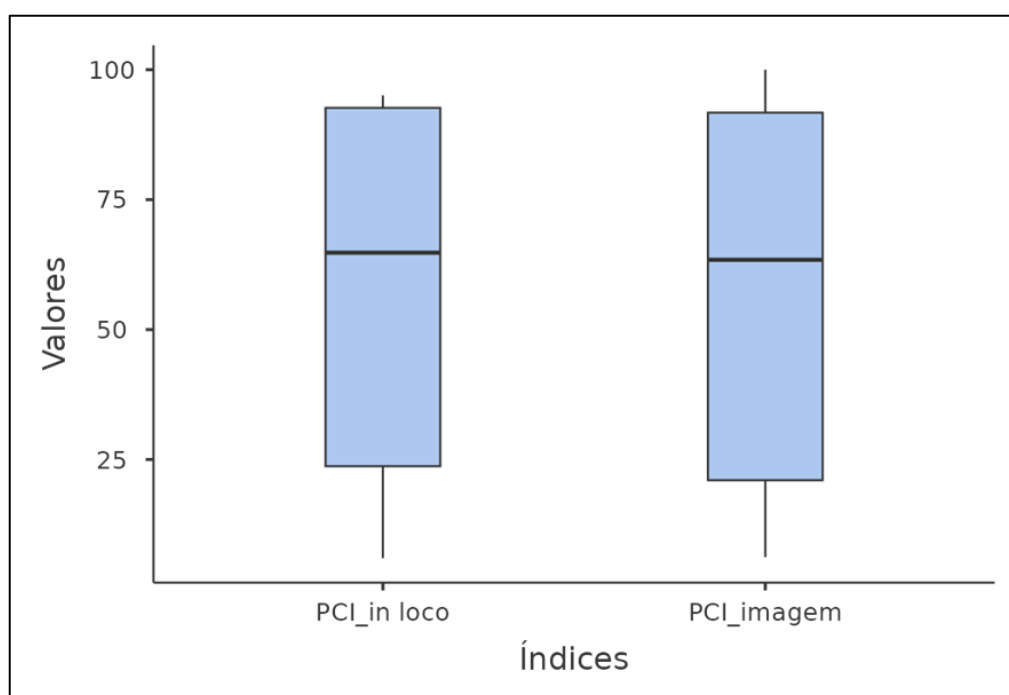
Fonte: o próprio autor

O p-valor de 0,052, que está muito próximo do nível de significância de 0,05, sugere uma tendência de diferença significativa, embora não seja possível rejeitar completamente a hipótese nula (H_0), que assume a inexistência de diferenças significativas entre os índices. Como o valor deu muito próximo, foram calculadas medidas adicionais para avaliar a magnitude da diferença entre PCI_*in loco* e PCI_*imagem*.

Embora a diferença média entre as avaliações tenha sido de 0,802, com um erro-padrão de 0,492, isso indica uma variação relativamente baixa entre os índices. A dimensão do efeito de 0,559 sugere um efeito de magnitude moderada a forte, indicando que, apesar de o p-valor não indicar uma diferença estatisticamente significativa, existe uma tendência de variação entre as abordagens.

Adicionalmente, foi realizado o teste de correlação de Spearman, que revelou um coeficiente de correlação de $r = 0,995$ e um p-valor de 0,001. Isso indica uma relação perfeita entre as duas variáveis, com a probabilidade de observar essa correlação por acaso sendo extremamente baixa. Portanto, os resultados são considerados estatisticamente significativos. A alta correlação sugere que ambas as abordagens são equivalentes do ponto de vista estatístico. Além disso, foi realizada a análise do boxplot, representado na Figura 5.15, para visualizar a distribuição dos dados e a comparação entre os índices PCI_*in loco* e PCI_imagem.

Figura 5.15 – Boxplots do PCI_*in loco* e PCI_imagem nos trechos B e C



Fonte: o próprio autor

A análise dos dados do diagrama de caixa revela que os dois métodos de avaliação, PCI_*in loco* e PCI_imagem, apresentam uma consistência considerável. As medianas próximas a 60 pontos e intervalos interquartis entre aproximadamente 30 e 90 pontos indicam que a distribuição da qualidade do pavimento é bastante similar em ambos os métodos.

Além disso, esse padrão sugere que, independentemente da abordagem utilizada, a avaliação da qualidade do pavimento segue uma tendência

semelhante, reforçando a ideia de que o método PCI_{imagem} possui um comportamento estatístico comparável ao $PCI_{in loco}$. A ausência de outliers é um aspecto importante, pois indica que os dados são homogêneos e não há discrepâncias significativas entre as medições, indicando um comportamento consistente entre as abordagens.

De modo geral, esses resultados mostram que a avaliação de pavimentos por fotogrametria utilizando imagens fornece resultados coerentes com a inspeção *in loco*. Ainda com os resultados da avaliação objetiva, foi possível verificar a classificação das UAs, com base nos índices $PCI_{in loco}$ e PCI_{imagem} , como pode ser observado na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Classificação da condição do pavimento com base no $PCI_{in loco}$ e PCI_{imagem} nos trechos B e C

Trecho	UA	$PCI_{in loco}$	Classificação	PCI_{imagem}	Classificação
B	184	93,20	Excelente	93,05	Excelente
	185	91,05	Excelente	87,82	Excelente
	186	95,05	Excelente	95,05	Excelente
	187	94,31	Excelente	93,05	Excelente
	188	59,27	Boa	58,99	Boa
	189	65,07	Boa	63,80	Boa
	190	95,05	Excelente	94,69	Excelente
	191	95,05	Excelente	94,41	Excelente
	192	79,05	Muito boa	78,74	Muito boa
	193	70,59	Muito boa	69,13	Boa
	194	62,77	Boa	62,32	Boa
	195	64,51	Boa	63,05	Boa
C	139	22,14	Muito ruim	20,56	Muito ruim
	140	11,17	Muito ruim	13,50	Muito ruim
	141	6,90	Péssima	10,36	Muito ruim
	142	19,97	Muito ruim	18,61	Muito ruim
	143	28,41	Ruim	21,72	Muito ruim
	144	6,00	Péssima	6,21	Péssima

Fonte: o próprio autor

Analisando as UAs no trecho B, as diferenças entre as classificações foram mínimas, com a maioria das unidades mantendo a classificação, diferindo apenas em uma unidade. A UA 193 tem um $PCI_{in loco}$ de 70,59 (muito boa),

enquanto o PCI_{imagem} é 69,13 (boa), uma mudança na categoria, indicando uma piora na classificação baseada na imagem. Para esses trechos, as unidades estão classificadas de excelente a boa.

Já no trecho C, observou-se que em duas unidades (UA 141 e UA 143), as classificações por $PCI_{in loco}$ e PCI_{imagem} divergiram. A UA 141, com $PCI_{in loco}$ de 6,90 (péssima), apresentou um PCI_{imagem} de 10,36 (muito ruim), sugerindo uma melhora na avaliação por imagem, que pode ter sido caudada pela perda de qualidade do ortomosaico desta UA. Por outro lado, a UA 143, com $PCI_{in loco}$ de 28,41 (ruim), teve um PCI_{imagem} de 21,72 (muito ruim), indicando uma piora na classificação baseada na imagem. Nesse trecho, as unidades estão na faixa de classificação ruim a péssimo.

Assim, sabendo a classificação de cada UA, observa-se na Tabela 5.18, os números de UAs classificadas com cada conceito, as cores da classificação seguem o padrão sugerido na (ASTM, 2024).

Tabela 5.18 – Número de UAs por classificação segundo o $PCI_{in loco}$ e o PCI_{imagem} nos trechos B e C

Classificação		$PCI_{in loco}$	PCI_{imagem}
Excelente	86 - 100	6	6
Muito Boa	71 - 85	2	1
Boa	56 - 70	4	5
Regular	41 - 55	0	0
Ruim	26 - 40	1	0
Muito Ruim	11 - 25	3	5
Péssima	0 - 10	2	1
Total		18	

Fonte: o próprio autor

Nota-se que, por meio do $PCI_{in loco}$ e PCI_{imagem} , 6 unidades foram classificadas com pontuação “Excelente” (100 a 86 pontos). Em relação à classificação “Muito Boa” (85 a 71 pontos), 2 e 1 UAs, no $PCI_{in loco}$ e PCI_{imagem} , respectivamente. 4 UAs no índice $PCI_{in loco}$ e 5 UAs no índice do PCI_{imagem} foram classificadas como “Boa” (70 a 56 pontos). Percebe-se também que, em ambos os métodos, nenhuma unidade apresentou classificação “Regular” (55 a 41 pontos). Em $PCI_{in loco}$, 1 foi classificada como “Ruim” (40 a 26 pontos) e

nenhuma no PCI_{imagem}. A classificação “Muito Ruim” (25 a 11 pontos) teve 3 UAs em PCI_{in loco} e 5 no PCI_{imagem}. Por fim, “Péssima” (10 a 0 pontos) no método PCI_{in loco} foi de 2 e 1 no PCI_{imagem}.

Portanto, no índice do PCI_{in loco} e do PCI_{imagem}, 33% das UAs foram avaliadas com notas abaixo de 55 pontos (classificação regular, ruim, muito ruim e péssima), que são as UAs do trecho C, enquanto 67% das notas foram classificadas como “Boa”, “Muito Boa” e “Excelente” que são as UAs do trecho B. Adicionalmente, com base na média do PCI para cada trecho, pode-se observar na Tabela 5.19 as classificações para essas situações.

Tabela 5.19 – Média do PCI_{in loco} e do PCI_{imagem} PCI nos trechos B e C

UA	PCI _{in loco}	Classificação	PCI _{imagem}	Classificação
B	80,41	Muito boa	79,51	Muito boa
C	15,77	Muito ruim	15,16	Muito ruim

Fonte: o próprio autor

Observa-se que, em ambos os trechos, a média do PCI_{imagem} foi menor que a do PCI_{in loco}, refletindo uma condição pior. Isso sugere que a identificação dos defeitos foi mais precisa quando realizada em um ambiente controlado.

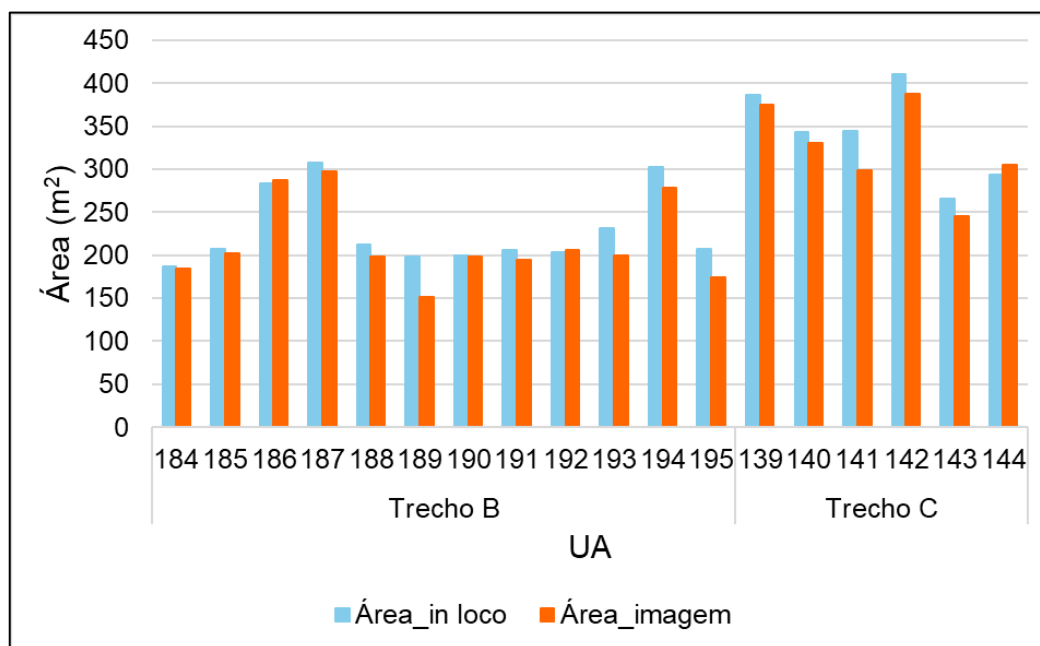
No trecho B, a classificação permanece "Muito boa" para ambos os métodos, com valores médios muito próximos (80,41 vs. 79,51 imagem). No trecho C, tanto o PCI_{in loco} (15,77) quanto o PCI_{imagem} (15,16) indicam uma classificação "Muito ruim". Em resumo, o trecho B está em melhor condição, enquanto o trecho C representa uma área em pior estado.

Ao final de tudo, foi observada uma alta concordância entre os resultados dos índices, sugerindo que a metodologia fotogramétrica tem boa estabilidade na classificação por unidade amostral. Realizou-se também uma análise comparativa entre as medições de área obtidas, observando a relação de Área_{in loco} com Área_{imagem} obtida no AutoCAD.

Em campo, a área foi calculada com base em um modelo retangular, multiplicando-se o comprimento pela largura da UA. Já no AutoCAD, a área foi determinada a partir de um desenho circunscrito que cobre toda a UA. O gráfico

da Figura 5.16 apresenta as medições de área para cada unidade amostral, tanto *in loco* quanto por imagem no AutoCAD.

Figura 5.16 – Comparação gráfica entre a *Área_in loco* e a *Área_imagem* nos trechos B e C



Fonte: o próprio autor

As diferenças entre *Área_in loco* e *Área_imagem* variaram significativamente, com valores de diferença chegando a até 50 m². Na UA 189 do trecho B e na UA 141 do trecho C apresentaram as maiores discrepâncias. Por outro lado, as UAs do trecho B, como a UA 190, apresentaram diferenças menores, com apenas 1 m² de variação entre os procedimentos.

A análise revelou que a medição *Área_in loco*, com o uso do modelo retangular, tende a superestimar a área real. Foi observado que em 15 UAs a mensuração *in loco* foi maior do que no AutoCAD, enquanto em apenas 3 unidades essa diferença foi inversa.

Por outro lado, a mensuração no AutoCAD, que utiliza o desenho circunscrito, reflete de maneira mais fiel a área real da UA, levando em consideração suas características geométricas específicas. As diferenças observadas podem ser atribuídas à limitação do modelo simplificado em campo, que não considera as curvas e variações presentes no contorno das UA.

5.2.3 Comparação das Estratégias de Intervenção

De acordo com a pontuação obtida nos índices, foi indicada uma atividade de intervenção para cada UA: manutenção preventiva, atividade de reabilitação do pavimento ou a reconstrução. A escala de classificação seguiu as considerações feitas por Shahin (2005). Na Tabela 5.20 estão os números de UAs que receberam a mesma indicação de intervenção. E na Tabela 5.21, são apresentadas as pontuações de cada UA a partir de cada índice com a estratégia de intervenção a ser adotada.

Tabela 5.20 – Número de UAs por classificação de intervenção segundo o PCI_*in loco* e o PCI_*imagem* nos trechos B e C

Classificação		PCI_<i>in loco</i>	PCI_<i>imagem</i>
Manutenção preventiva	71 - 100	8	7
Reabilitação	41 - 70	4	5
Reconstrução	0 - 40	6	6
Total		18	

Fonte: o próprio autor

Tabela 5.21 – Estratégias de intervenção do PCI_*in loco* e do PCI_*imagem* nos trechos B e C

Trecho	UA	PCI_ <i>in loco</i>	Classificação	PCI_ <i>imagem</i>	Classificação
B	184	93,20	Manutenção preventiva	93,05	Manutenção preventiva
	185	91,05	Manutenção preventiva	87,82	Manutenção preventiva
	186	95,05	Manutenção preventiva	95,05	Manutenção preventiva
	187	94,31	Manutenção preventiva	93,05	Manutenção preventiva
	188	59,27	Reabilitação	58,99	Reabilitação
	189	65,07	Reabilitação	63,80	Reabilitação
	190	95,05	Manutenção preventiva	94,69	Manutenção preventiva
	191	95,05	Manutenção preventiva	94,41	Manutenção preventiva
	192	79,05	Manutenção preventiva	78,74	Manutenção preventiva
	193	70,59	Manutenção preventiva	69,13	Reabilitação
	194	62,77	Reabilitação	62,32	Reabilitação
	195	64,51	Reabilitação	63,05	Reabilitação
C	139	22,14	Reconstrução	20,56	Reconstrução
	140	11,17	Reconstrução	13,50	Reconstrução
	141	6,90	Reconstrução	10,36	Reconstrução
	142	15,77	Reconstrução	15,16	Reconstrução
	143	28,41	Reconstrução	21,72	Reconstrução
	144	6,00	Reconstrução	6,21	Reconstrução

Fonte: o próprio autor

Para o trecho B, na comparação do PCI, foi indicada a mesma intervenção em 11 das 12 UAs, sendo todas as UAs que receberam a indicação de manutenção preventiva e reabilitação como estratégia de intervenção. A principal divergência ocorreu na UA 193, onde PCI_*in loco* foi recomendado manutenção preventiva, enquanto no PCI_*imagem* foi indicada atividade de reabilitação. Nota-se também que o maior número de indicações foi equivalente ao de manutenção preventiva, em 8 UAs para o PCI_*in loco* e 7 para o PCI_*imagem* no trecho B.

No trecho C, em ambos os índices, foi sugerida a reconstrução do pavimento para as 6 UAs. Isso indica que, em condições de degradação mais severa, ambas as abordagens convergem para a mesma estratégia de intervenção, reforçando a confiabilidade dos dados baseada em imagens para esse nível de deterioração.

Com base na média do PCI para cada trecho, pode-se observar que no trecho B, para o PCI_*in loco* (80,41) e o PCI_*imagem* (79,51), seria necessário realizar atividades de manutenção preventiva nas vias. Já para o trecho C, em ambos os índices, PCI_*in loco* (15,77) e o PCI_*imagem* (15,16), se adequa à reconstrução das vias.

Essa análise também foi realizada para a avaliação subjetiva, de acordo com a pontuação obtida nos índices ICPsubj_*in loco* e ICPsubj_*imagem*, foi indicada uma atividade de intervenção para UA. Na Tabela 5.22 são apresentadas as pontuações de cada UA a partir de cada índice com a estratégia de intervenção a ser adotada.

Tabela 5.22 – Estratégias de intervenção do ICPsubj_*in loco* e ICPsubj_*imagem* no trecho C

UA	ICPsubj_ <i>in loco</i>	Classificação	ICPsubj_ <i>imagem</i>	Classificação
139	51,60	Reabilitação	54,80	Reabilitação
140	48,20	Reabilitação	42,00	Reabilitação
141	41,00	Reabilitação	37,00	Reconstrução
142	51,00	Reabilitação	54,60	Reabilitação
143	53,80	Reabilitação	63,20	Reabilitação
144	48,00	Reabilitação	53,60	Reabilitação

Fonte: o próprio autor

Com essas pontuações, variando entre 37 64 pontos, observa-se que a maioria das UAs, tanto na avaliação ICPsubj_*in loco* quanto na do ICPsubj_*imagem* estão indicadas a realização de atividade de reabilitação. A única divergência ocorre na UA 141, na qual a avaliação por imagem indica a necessidade da atividade de reconstrução.

No geral, a comparação entre as estratégias de intervenção indicadas pelos índices *in loco* e por imagem mostrou que, na maioria dos casos, não houve diferenças significativas, tanto na avaliação objetiva quanto na subjetiva. Assim, os resultados sugerem que a metodologia baseada em imagens é uma alternativa viável para a avaliação da condição dos pavimentos urbanos,

apresentando alta compatibilidade com as inspeções presenciais e potencial para otimizar o processo de diagnóstico e tomada de decisão para intervenções.

5.2.4 Algumas Considerações sobre o Processamento e Geração dos Ortomosaicos

Para a análise do tempo de processamento dos ortomosaicos, foi considerado o seguinte fluxo de trabalho: importação dos vídeos no *software iTwin Capture Modeler*, extração dos frames, inserção dos pontos de escala nas imagens, processamento da aerotriangulação e, por fim, reconstrução do modelo para a geração do ortomosaico.

Ao todo, foram avaliadas 18 UAs, a partir de aproximadamente 110 vídeos e 26 mil frames extraídos. O tempo total de processamento atingiu cerca de 200 horas, com uma média de 11 horas por UA.

Em relação ao tamanho dos arquivos, cada pasta do *software iTwin*, contendo o processo de geração do ortomosaico, pode alcançar até 80 GB. O ortomosaico no formato .tiff, após ser convertido para PNG, resultou em um arquivo de 3 GB. O arquivo final no AutoCAD, contendo as informações de defeitos identificados nos ortomosaicos, tem cerca de 2 MB.

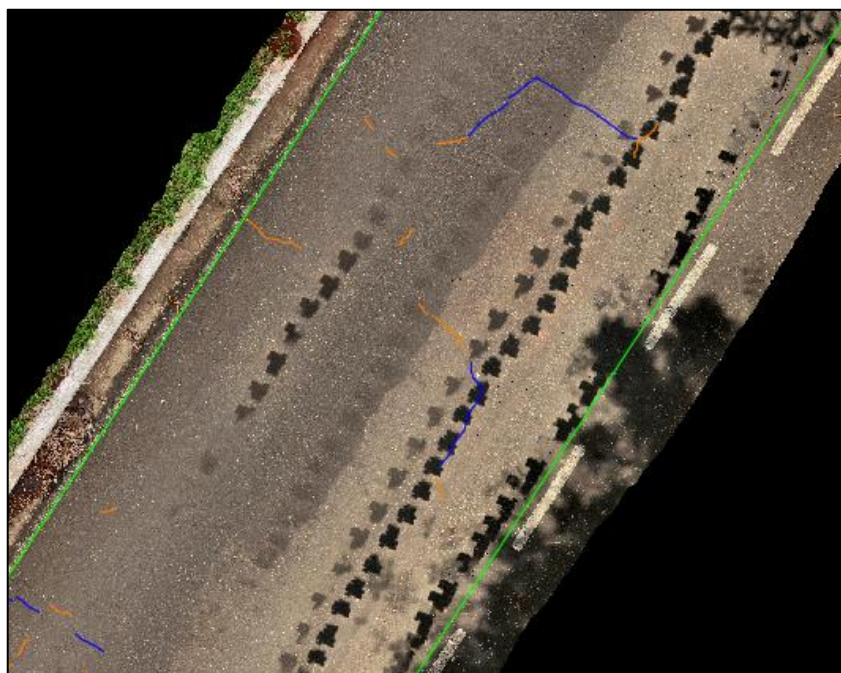
No total, para as 18 UAs, o espaço ocupado pelos arquivos foi de 1.140 GB referente às pastas do *software iTwin*, 54 GB com os ortomosaicos em formato PNG e 36 MB dos arquivos finais do AutoCAD. Assim, o armazenamento total utilizado foi de aproximadamente 1,2 TB.

Os resultados evidenciaram a elevada demanda computacional e de armazenamento envolvidos no processamento dos ortomosaicos, destacando a importância de um planejamento adequado dos recursos para a execução da metodologia. O tempo médio de processamento da UA e o grande volume de dados gerados reforçam a necessidade de uma infraestrutura robusta para garantir a eficiência do fluxo de trabalho.

Ao final da geração dos ortomosaicos, algumas unidades apresentaram modelos de baixa qualidade devido a fatores ambientais e técnicos. A presença de sombras de árvores na região de estudo comprometeu a captura das imagens, enquanto a sombra da alça do protótipo também interferiu em determinadas áreas, resultando em distorções nos registros visuais.

Essas falhas passaram despercebidas durante o procedimento de aquisição das imagens, influenciando diretamente a qualidade dos ortomosaicos gerados, conforme ilustrado na Figura 5.17.

Figura 5.17 – Ortomosaico com interferências da alça do protótipo e de sombras



Fonte: o próprio autor

A identificação dessas limitações destaca a importância de estratégias para mitigar interferências durante a captura das imagens, como ajustes na fixação do smartphone e no posicionamento do protótipo. Medidas preventivas contribuem para a melhoria da qualidade dos ortomosaicos e aumentar a precisão das análises realizadas.

Uma particularidade importante na análise dos defeitos observados foi em relação à medição do defeito buraco. Para determinar a severidade desse defeito, é necessário considerar sua profundidade. No entanto, como a análise foi realizada a partir do ortomosaico, não foi possível avaliar a profundidade, restringindo-se à medição das dimensões planas das falhas na superfície. Neste estudo, a profundidade dos buracos foi assumida conforme os valores obtidos *in loco*, enquanto as imagens foram utilizadas para determinar as dimensões planas e finalizar o cálculo da severidade do defeito.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo aplicar e validar um método para a avaliação de pavimentos flexíveis urbanos utilizando *smartphones*. Os resultados obtidos confirmam a viabilidade técnica da metodologia, destacando sua simplicidade na coleta de dados e sua compatibilidade com ferramentas digitais avançadas.

A padronização dos parâmetros de aerotriangulação foi essencial para garantir a qualidade e consistência dos modelos, minimizando erros na análise. A comparação entre os procedimentos de aquisição de imagens por fotos e vídeos revelou que, embora as fotos ofereçam maior controle de qualidade, os vídeos agilizam a coleta sem comprometer a precisão. Em relação aos *softwares*, tanto o AutoCAD quanto o *iTwin Capture Manage And Extract* conseguiram identificar defeitos, mas o AutoCAD se destacou como melhor opção para a mensuração e manipulação dos dados.

A validação do método foi fortalecida pela comparação entre as avaliações subjetivas e objetivas, com os dados obtidos nas imagens e observações *in loco*. Observou-se que as percepções sobre a condição do pavimento variam dependendo do contexto da avaliação.

A avaliação subjetiva por imagem teve uma tendência mais otimista, possivelmente influenciada por fatores que impactaram a qualidade dos ortomosaicos. Em contrapartida, a avaliação *in loco* refletiu uma percepção mais conservadora, sendo afetada por fatores externos, como o desconforto físico durante a coleta de dados, o que levou a uma subestimação dos defeitos. Nessa avaliação, os dados resultaram em pequenas diferenças em algumas UAs, mas os testes estatísticos confirmaram que não houve diferença significativa entre as médias das pontuações, demonstrando a equivalência dos dois procedimentos. No entanto, a correlação entre os avaliadores variou, possivelmente devido às diferenças na interpretação dos critérios ou na qualidade das imagens.

Na avaliação objetiva por imagem, realizada em um ambiente controlado, observou-se uma identificação mais precisa dos defeitos no pavimento, enquanto a avaliação em campo, sob condições menos confortáveis, subestimou a gravidade dos defeitos. Com os dados coletados, mesmo com pequenas

variações, observou-se uma correlação praticamente perfeita entre os dois métodos.

Em relação à comparação entre as estratégias de intervenção, mostrou que, na maioria dos casos, não houve diferenças significativas entre a avaliação objetiva e subjetiva. Isso indica que a metodologia baseada em imagens é uma alternativa viável, com alta compatibilidade para inspeções presenciais, destacando a importância de considerar o contexto e os fatores externos durante as avaliações de pavimentos.

A validação do uso do *smartphone* na adaptação do PAIPA mostrou que essa ferramenta é eficiente, tornando o processo mais acessível, apesar dos desafios relacionados à estabilização e à qualidade das imagens. A análise do software *iTwin* na avaliação de pavimentos urbanos destacou sua importância para o processamento e interpretação de modelos 3D.

Este estudo contribui para o avanço das técnicas de avaliação de pavimentos, oferecendo uma alternativa digital que pode otimizar tempo e recursos. Com ajustes e aprimoramentos, essa metodologia tem o potencial de complementar ou substituir métodos convencionais em determinados cenários, aumentando a eficiência das inspeções.

No entanto, o método utilizado apresentou algumas limitações que impactaram a eficiência da avaliação. Interferências visuais, como sombras de árvores e postes, dificultaram a criação do modelo, comprometendo a precisão em algumas áreas. Além disso, o tamanho dos arquivos gerados resultou em longos tempos de *download* e ocupação de muito espaço no aparelho, tornando o processo mais demorado. O uso do AutoCAD para avaliação subjetiva não foi ideal, sendo aplicado somente em 6 UAs, devido à lentidão e aos travamentos causados pelos arquivos grandes. Outro ponto relevante foi a impossibilidade de realizar o georreferenciamento das imagens, já que os frames dos vídeos não vinham georreferenciados. Esses aspectos poderiam ser mais explorados em estudos futuros para aprimorar o processo de avaliação.

REFERÊNCIAS

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Design of Pavement Structures**. Washington, D.C., 1993.

ALBUQUERQUE, T.P. **Índice de Condição Baseado em Defeitos Superficiais para Gerência de Pavimentos Urbanos**. 2017. 140 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

ANDRADE, José Bittencourt de. *Fotogrametria* – Curitiba, SBEE, C1998. xvi, 246 p.

ArcGIS Web Map. Sistema de Informação Geográfica de Londrina. Disponível em: <<https://geo.londrina.pr.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=5360a454d15146a3bcf4ebdbe8e49e03>>. Acesso em: 25 de janeiro de 2025.

ASPHALT INSTITUTE. **A Pavement Rating System for Low-Volume Asphalt Roads**. Information Series No. 169 (IS-169), Lexington, KY, 1981.

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.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D6433-99 Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys**, 1999.

ATENCIO, E. *et al.* Calibration of UAV flight parameters for pavement pothole detection using orthogonal arrays. **Automation in Construction**, v. 143, p. 104545–104545, 18 set. 2022.

BAGI, O. Uniwersytet Warszawski Instytut Archeologii The Applications of Photogrammetry and 3-D Visualisation During Archaeological Fieldwork., 2018.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentos asfálticos: patologia e manutenção**. São Paulo: Plêiade, 1997.

BERTOLLO, S. A. M. **Considerações Sobre a Gerência de Pavimentos Urbanos em Nível de Rede**. 1997. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 1997.

BRANCO, L. H. C. MANIAC: uma metodologia para o monitoramento automatizado das condições dos pavimentos utilizando VANTs. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, p. 193, 2016.

CHAMBON, S.; MOLIARD, J. M. Automatic Road Pavement Assessment with Image Processing: Review and Comparison. **International Journal of Geophysics**, v. 2011, p. 1–20, 2011.

CHAMORRO, A., TIGHE, S. L., LI, N., & KAZMIEROWSKI, T. J. Development of Distress Guidelines and Condition Rating to Improve Network Management in Ontario, Canada. **Transportation Research Record**, v. 1, n. 2093, p. 128–135, 2009. DOI: <https://doi.org/10.3141/2093-15>.

CHEN, X. *et al.* URMS: Graphical Urban Roadway Management System at Network Level. **Transportation Research Record** 1397. TRB. National Research Council. Washington, D.C., p. 103-111. 1993.

CHEN, J. *et al.* Real-time identification system of asphalt pavement texture based on the close-range photogrammetry. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 910–919, 30 nov. 2019.

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de Rodovias 2024**. Brasília: CNT, 2024. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/pesquisa-cnt-de-rodovias-2024-aponta-a-necessidade-de-reforco-continuo-da-infraestrutura-rodoviaria-brasileira>. Acesso em: 24 de agosto de 2024.

COELHO FILHO, Luiz Carlos Teixeira; SILVA, Jorge Luís Nunes Brito. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro: Eduerj, 2007. 196 p.

CÓRDOBA, P. A. F. **Levantamento fotogramétrico de monumentos arquitetônicos para projetos de restauração - Estudo de Caso: Palacio Itamaraty – Brasília, DF**. 2012. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2012.

DANIELESKI, M. L. **Proposta de Metodologia para Avaliação Superficial de Pavimentos Urbanos: Aplicação à Rede Viária de Porto Alegre**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

DI RENZO, André Biffe. **Desenvolvimento de Metodologia para Monitoramento Remoto de Rodovias – VANTRod**. 2017. 96 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PA, Brasil 2017.

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. Procedimento - 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.

DPPreview. Iphone 11. Disponível em: <https://www.dpreview.com/products/apple/mobilephones/apple_iphone11/specifications>. Acesso em: 20 de agosto de 2024.

FARASHAH, M. K. **Development Practices for Municipal Pavement Management Systems Application**. 2012. Thesis (Master of Applied Science in Civil Engineering). University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canadá, 2012.

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.

FERNANDES JÚNIOR, J. L. **Sistemas de Gerência de Pavimentos Urbanos para Cidades de Médio Porte**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo, 2001.

FERREIRA, Alexandre Moreno Richwin. **Avaliação de câmara de pequeno formato transportada por veículo aéreo não tripulado-VANT, para uso em aerolevanteamento**. 2014, 93p. Tese de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Brasília, Brasília, 2014

FONTENELE, H. B. **Estudo para Adaptação de um Método de Classificação de Estradas não Pavimentadas às Condições do Município de São Carlos/SP**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 2001.

FRASER, C. S.; CRONK, S. A hybrid measurement approach for close-range photogrammetry. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 64, n. 3, p. 328–333, maio 2009.

GARCIA, Carolina; NERI, Thiago Botion; FONTENELE, Heliana Barbosa. **Procedimento de aquisição de imagens do pavimento e avaliação de defeitos (PAIPA)**. Tese de doutorado em andamento. Universidade Estadual de Londrina, 2024. Manuscrito em desenvolvimento.

GIMENES, L. A. *et al.* Avaliação de pavimentos flexíveis urbanos com o uso de aeronave remotamente pilotada à baixa altura para análise de levantamento de defeitos. *In*: **Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, 2023, Santos.

GIMENES, SILVA JÚNIOR e FONTENELE. Investigação da correlação entre sistemas de avaliação da condição de pavimentos flexíveis. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**, v.8, n.2,2023.

GOMES, D. S., MENDONÇA, F. J. B., CARDOSO, L. C., TORRES, M. S. S., HOLANDA, T. F. (2020). Aplicação do fotorrealismo preciso de pequenos monumentos utilizando Fotogrametria Digital a curta distância com câmera de *smartphone*. **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v.1, n.3, p.02-11

Google Earth. Disponível em:< <https://www.google.com.br/earth/>>. Acesso em: 25 de janeiro de 2025.

GROETELAARS, Natalie Johanna; AMORIM, Arivaldo Leão de. Técnicas de restituição fotogramétricas digitais aplicadas à Arquitetura: um estudo de caso. In: **COBRAC – Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário**, 6., 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis: UFSC, 2004.

HAAS, R.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. **Modern Pavement Management**. **Krieger Publishing Company**. Malaba. Florida, 1994.

Hass, R.; Hudson, W.R. *Pavement Management System*. McGraw-Hill, New York, 1978

HARTGEN, D. T.; SHUFON, J.J.; PARRELLA, F. T.; KOEPEL, K. W. P. Visual Scales of Pavement Condition: Development, Validation, and Use. **Transportation Research Record** n° 893, p.1-6, 1982.

HEADQUARTERS, DEPARTMENT OF THE ARMY. **Pavement maintenance management**. Technical Manual n° 5-623. Washington, 1982.

IGNÁCIO, L.F.S.; PEREIRA, L.A.; PALMA, L.C.R.; SILVA JÚNIOR, C.A.P.; FONTENELE, H.B. **Análise da Estabilidade de uma Escala Visual na Avaliação de Pavimentos**. 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. Gramado, Rio Grande do Sul, 2018

KHEDR, S. A.; EI DIMEERY, I. A. Pavement Management System for Provinces in Developing Countries: Implementation in Fayoum, Egypt. **Transportation Research Record** 1455. 1455. TRB. National Research Council. Washington, D.C., p. 101-110. 1994

KOGBARA, R. B. *et al.* Relating surface texture parameters from close range photogrammetry to Grip-Tester pavement friction measurements. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 227–240, mar. 2018.

LÁZARO, B. D. O. *et al.* Avaliação das condições de superfície de pavimentos urbanos com o auxílio de ferramentas de análise espacial. **Transportes**, v. 30, n. 1, p. 1–17, 2022

LIMA NETO, P. S. **Uma metodologia para levantamento de defeitos em pavimentos urbanos flexíveis com o uso de aeronave remotamente pilotada**. 2019. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2019.

LIMA, J. P.; RAMOS, R. A. R.; FERNANDES JÚNIOR, J. L. **A Prática de Gestão de Pavimentos em Cidades Médias Brasileiras**. In: 2º CONGRESSO LUSO BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO, REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL - PLURIS, 2, 2006, Braga - Portugal. **Anais [...]**.

LIU, Y. *et al.* **3D Imaging, Analysis and Applications**. [s.l.] Springer Nature, 2020.

LIU, W.-C.; HUANG, W.-C.: **Close range digital photogrammetry applied to topography and landslide measurements**, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLI-B5, 875-880, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-875-2016>, 2016.

LUHMANN, T.; FRASER, C.; MAAS, H.-G. Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 115, p. 37–46, maio 2016.

MARCHETTI, D. A. B.; GARCIA, G. J. **Princípios de Fotogrametria e Fotointerpretação**. São Paulo: Nobel, 1977. 2573p.

MATOS, F. C. de. **Gerência da Manutenção da superfície de Rolamento de Vias Urbanas utilizando SIG**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MENA, L. P. C.; TORRES, B. A. Z. Evaluación del desgaste de pavimento flexible mediante el uso de fotogrametría de corto alcance. **Avances Investigación en Ingeniería**, v. 18, n. 1, 3 dez. 2020.

MENDONÇA, F. J. B. **Monitoração de estruturas de concreto com fotogrametria à curta distância**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1984.

MINNESOTA ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. **A Pavement Rating System for Asphalt Pavement**. Minnesota, EUA. 2012. Disponível em: <https://cdn.ymaws.com/www.asphaltisbest.com/resource/resmgr/resources-engineering/apavement-rating-system.pdf>.

OLIVEIRA, F. M.; SILVA JÚNIOR, C. A. P.; FONTENELE, H. B. Desenvolvimento de escala visual para avaliação da condição da superfície de vias urbanas. **Conexões: Ciência e Tecnologia**, v. 7, p. 31-47, 2013. DOI: <https://doi.org/10.21439/conexoes.v7i1.569>.

OLIVEIRA, J. J.; FERNANDES JÚNIOR, J. L.; LOPES, S. B.; PEREIRA, C. R. Implantação de Um Sistema Dinâmico de Gerência de Pavimentos Urbanos (SDGPU) em Cidade de Médio Porte. In: PLURIS - PLANEJAMENTO URBANO REGIONAL INTEGRADO E SUSTENTÁVEL, 2012, Brasília - DF. **Anais [...]**.

OSORIO, A. **Development of Performance Models of Urban Pavements for Network Analysis**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de Waterloo, Waterloo, Canadá, 2015.

PARENTE, Dênis Cardoso; FELIX, Natália Carvalho; PICANÇO, Aurélio Pessoa. Utilização de veículo aéreo não tripulado (VANT) na identificação de patologia superficial em pavimento asfáltico. *Revista Alconpat*, [s.l.], v. 7, n. 2, p.160-360, 31 maio 2017. *Revista ALCONPAT*. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i2.161>.

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

PEREIRA, L. A. **Escala Visual: Uma Ferramenta para a Avaliação da Condição da Superfície de Pavimentos Urbanos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

PESCADOR JUNIOR, A. C.; DA SILVA JUNIOR, C. A. P.; FONTENELE, H. B. Comparação De Métodos De Avaliação Da Condição De Pavimentos Flexíveis Com O Auxílio De Um Sig-T. *Revista CIATEC-UPF*, v. 10, n. 1, p. 95–103, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5335/ciatec.v10i1.7297>.

POSPÍŠIL, J. **Digital Reconstruction of Archaeological Finds**, 2012. MASARYKOVA UNIVERZITA.

PRESTES, M.P., **Método de avaliação visual de pavimentos flexíveis – Um estudo comparativo**. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ROMERO-CHAMBI, E. *et al.* Analysis of Optimal Flight Parameters of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Detecting Potholes in Pavements. *Applied Sciences*, v. 10, n. 12, p. 4157, 17 jun. 2020.

SALVIATTO, V. H. **Ferramenta de Avaliação da Condição de Pavimentos Flexíveis Urbanos Baseada em uma Análise Multicritério**. 120 p. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

SCHNEBELE, E. *et al.* Review of remote sensing methodologies for pavement management and assessment. *European Transport Research Review*, v. 7, n. 2, 2015.

SHAHIN, M. Y.; KOHN, D. S. **Development of a pavement condition rating procedure for roads, streets and parking lot**. CERL-TR-M-268, U. S. Army, 1979, vol. 1 e 2.

SHAHIN, M. Y. **Pavement Management for Airports, Roads and Parking Lots**. 2. ed. New York: Springer, 2005

SHAH, Y. U.; JAIN, S.S.; TIWARI, D.; JAIN, M.K. Modeling the pavement serviceability index for urban roads in Noida. *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 6, n. 1, p. 66–72, 2013a.

SHRP - STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement performance Studies**. National Academy of Science. Washington, D.C, 1993.

SONCIM, S. P. **Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de pavimentos asfálticos com base em dados da rede de rodovias do Estado da Bahia**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 2011.

SOUZA, F. S. V. **Avaliação do Desempenho de Pavimentos Restaurados por Meio de Técnicas de Reciclagem de Materiais de Pavimentação**. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

SOUZA, A. A. **Avaliação objetiva da superfície de pavimentos asfálticos com o uso de geotecnologias**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2020.

TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria Básica**. Presidente Prudente, SP: UNESP, 2009. 195p

ZANCHETTA, F. **Sistema de Gerência de Pavimentos Urbanos: Avaliação de Campo, Modelo de Desempenho e Análise Econômica**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.